SÉRIE E.
N° D'ORDRE : 49

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

M. Paul SELTZER

Aide-Météorologiste
à l'Institut de Météorologie et de Physique du Globe
de l'Algérie

1re **THÈSE.** — ÉTUDES MICROMÉTÉOROLOGIQUES EN ALSACE.

2e **THÈSE.** — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 10 octobre 1935 devant la Commission d'examen

MM. E. ROTHÉ ..... *Président*
H. CHERMEZON .....
G. REMPP ..... *Examinateurs*
J. LACOSTE .....

IMPRIMERIE ALSACIENNE
STRASBOURG
1935

SÉRIE E,
Nº D'ORDRE : 49

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

M. Paul SELTZER

Aide-Météorologiste
à l'Institut de Météorologie et de Physique du Globe
de l'Algérie

1re **THÈSE.** — ÉTUDES MICROMÉTÉOROLOGIQUES EN ALSACE.

2e **THÈSE.** — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 10 octobre 1935 devant la Commission d'examen

MM. E. ROTHÉ..... *Président*
H. CHERMEZON ..... } *Examinateurs*
G. REMPP..... }
J. LACOSTE..... }

IMPRIMERIE ALSACIENNE
STRASBOURG
1935

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

Doyen ..... M. E. ROTHÉ, Professeur de Physique du Globe.
Doyen honoraire ..... M. E. BATAILLON.
Professeurs honoraires ..... MM. E. CHATTON, E. ESCLANGON, M. FRÉCHET, H. GAULT, M. GIGNOUX, L. HACKSPILL, E. DE MARGERIE, G. RIBAUD, E. TOPSENT, H. VILLAT.

	MM.	
Professeurs	P. WEISS	Physique générale.
	H. OLLIVIER	Physique générale.
	C. HOUARD	Botanique.
	E. TERROINE	Physiologie générale.
	J. DE LAPPARENT	Minéralogie et Pétrographie.
	R. THIRY	Mécanique rationnelle.
	G. CERF	Analyse supérieure.
	G. DUBOIS	Géologie et Paléontologie.
	P. FLAMANT	Calcul différentiel et intégral.
	E. CORNEC	Chimie générale.
	A. DANJON	Astronomie.
	P. DE BEAUCHAMP	Zoologie et Anatomie comparée.
	L. BOUNOURE	Biologie générale.
	R. ROMANN	Chimie minérale et Chimie physique.
	G. FOËX	Physique expérimentale.
	A. KIRRMANN	Chimie organique.
	N	Mathématiques générales.
	H. CHERMEZON	Botanique.
	G. REMPP	Physique du Globe.
	J. LACOSTE	Physique du Globe.
	H. WEISS	Physico-chimie du Pétrole.
	G. HUGEL	Chimie du Pétrole.
Maîtres de conférences	CH. STAEHLING	Chimie appliquée.
	P. SOLEILLET	Physique mathématique.
	R. BONNET	Physique et Chimie biologiques.
	A. ROUSSEL	Mathématiques générales.
	A. CHRÉTIEN	Chimie minérale.
	J. MARESQUELLE	Botanique.
	R. HOVASSE	Biologie générale.
	P. A. REMY	Zoologie.
	H. CARTAN	Mathématiques.
	H. FORESTIER	Chimie.
	L. NÉEL	Physique générale.
	R. HOCART	Minéralogie.
	A. WEIL	Mathématiques.

Secrétaire ..... G. CUVIER.

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

A la Mémoire de mon Père

A Monsieur E. ROTHÉ

Doyen de la Faculté des Sciences de Strasbourg
Directeur de l'Institut de Physique du Globe
Secrétaire de l'Association Internationale de Séismologie

En hommage de ma très sincère gratitude
et de mon profond dévouement

ÉTUDES MICROMÉTÉOROLOGIQUES EN ALSACE

par

PAUL SELTZER

INTRODUCTION.

Les mesures quotidiennes, faites en une station donnée sous l'abri météorologique, ne sauraient représenter, d'une manière rigoureuse, la valeur des éléments météorologiques pour l'ensemble de la région qui environne la station. La température et l'humidité de l'air varient considérablement d'un point à l'autre, surtout en fonction du relief du sol, de son exposition et de sa couverture, et notamment au voisinage immédiat du sol : le caractère sporadique des gelées printanières, localisées dans les bas-fonds et cuvettes, ou encore les apparitions tout à fait locales des brumes matinales, le prouvent d'une façon frappante. Les écarts sont surtout très prononcés par ciel clair ; au contraire, le mauvais temps atténue les différences de climat qu'il peut y avoir entre deux points voisins.

D'autre part, ces mêmes éléments, tout comme le vent, dépendent dans une très large mesure de la hauteur au-dessus du sol, surtout dans la couche d'air comprise entre le niveau habituel de l'abri thermométrique et la surface du sol ; le gradient thermique, par exemple, peut y atteindre des valeurs extraordinairement élevées, que l'on ne rencontre nulle part ailleurs.

La première couche d'air doit donc être considérée, au point de vue de la Météorologie générale, comme une couche perturbée ; en terrain dégagé, ce n'est qu'à partir de $1^m,50$ ou 2^m au-dessus du sol que les observations recueillies dans les différentes stations d'un réseau météorologique deviennent comparables entre elles. D'ailleurs, une couverture végétale modifie d'une manière très sensible la répartition des éléments météorologiques et augmente ainsi l'épaisseur de la couche d'air perturbée.

Cependant l'étude de cette première couche d'air présente un grand intérêt, à la fois théorique et pratique. Elle est l'objet de la *Micrométéorologie*, autrefois simple chapitre de la Météorologie générale, et qui, depuis une dizaine d'années, s'en est en quelque sorte détachée pour devenir une science indépendante.

Ce développement est dû en grande partie à l'application de la météorologie à l'étude des organismes vivants, notamment à la Botanique : pour de nombreux végétaux croissant à faible hauteur au-dessus du sol, leur présence dans telle région ne peut s'expliquer si l'on ne fait pas intervenir le climat particulier de cette couche d'air, presque toujours plus *continental* qu'à la hauteur de l'abri. L'influence de l'exposition sur le rendement des cultures est une des preuves les plus nettes de l'existence de microclimats : la microclimatologie est donc essentiellement une climatologie *appliquée*. Elle l'est d'autant plus que l'homme peut, dans une certaine mesure, agir sur le microclimat, pour le modifier à son profit ; au contraire, la climatologie générale, ou, par opposition, la *Macroclimatologie*, est une science plutôt spéculative, statistique et explicative.

Mais l'intérêt théorique de la micrométéorologie n'est pas moindre : l'échauffement et le refroidissement de l'air prennent naissance à la surface du sol ; la première couche d'air au-dessus de cette surface suit le plus fidèlement ses variations de température, et l'étude de cette couche donne la clé du mécanisme — très complexe — de la propagation de la chaleur vers l'air libre.

Il va de soi, cependant, qu'il ne saurait être question de multiplier le nombre des stations météorologiques dans des proportions qui seraient tout à fait prohibitives. Les différences dans le but poursuivi ont conduit à la création d'une méthode nouvelle, celle des *coups de sonde*, qui se distingue nettement des méthodes purement

statistiques de la météorologie générale : les longues séries d'observations faites à intervalles réguliers sont remplacées par une étude, plus rapide, de tel ou tel cas particulier. Les écarts que font ressortir ces mesures, par rapport à celles qui sont faites simultanément sous l'abri météorologique, peuvent être considérés comme des *corrections* que l'on appliquera à ces dernières mesures, pour en déduire la valeur des éléments considérés en chaque point de la région. Un exemple typique de cette méthode est la prévision du minimum nocturne pour les divers points d'une région accidentée, à partir du minimum sous abri prévu pour la station de base au centre de ce district.

La majeure partie des travaux concernant la micrométéorologie a été publiée dans de nombreux articles disséminés dans les revues scientifiques étrangères. Il y a lieu de faire une place à part à une étude d'ensemble de ces questions, l'ouvrage « *Das Klima der bodennahen Luftschicht* », par R. GEIGER ; ce livre, d'un spécialiste de la micrométéorologie, donne, étayé sur une riche documentation, un excellent aperçu sur l'état actuel de cette science [1]).

M. E. ROTHÉ, Doyen de la Faculté des Sciences de Strasbourg, Directeur de l'Institut de Physique du Globe, et M. G. REMPP, Professeur à la Faculté des Sciences, Sous-Directeur du Service météorologique d'Alsace et de Lorraine, m'ont engagé à entreprendre des études de microclimats, au cours d'un séjour spécial de deux années en Alsace ; ces recherches ont été complétées ensuite par quelques mesures faites aux environs d'Alger.

N'ayant eu qu'exceptionnellement le concours de personnes bénévoles pour m'aider à des observations simultanées, je n'ai pu entreprendre certaines recherches de plus grande envergure, qui eussent nécessité un personnel trop nombreux, et aussi un séjour plus prolongé. J'espère que ce travail apportera néanmoins à la question une contribution nouvelle.

Que M. Rothé, dont l'enseignement, si vivant, a décidé de ma carrière dans la Physique du Globe, veuille bien trouver ici l'expression de ma profonde gratitude pour l'intérêt et la bienveillance qu'il n'a cessé de me témoigner durant mes études et mon séjour ultérieur à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg.

Je tiens aussi à adresser mes plus sincères remerciements à M. Rempp, dont les bons conseils m'ont guidé dans mes travaux et m'ont été précieux au cours de l'impression de ce mémoire.

Je remercie MM. Chermezon et Lacoste d'avoir accepté de faire partie de mon Jury.

Enfin, je dois des remerciements à M. Lasserre, Directeur de l'Institut de Météorologie et de Physique du Globe de l'Algérie, qui m'a donné toutes facilités pour obtenir un détachement de deux ans à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg, ainsi qu'a MM. les Membres du Conseil d'Administration de la Caisse Nationale des Sciences ; grâce à une proposition de M. Rothé, j'ai pu bénéficier d'une subvention accordée par cette Institution, ce qui m'a permis de réaliser le présent travail.

---

[1]) Dans un article publié dans *La Météorologie*, R. GEIGER a montré la place qu'occupent, dans la nature, les phénomènes micrométéorologiques, et l'importance de leur étude *(La Météorologie*, 1934, p. 86-96).

PREMIÈRE PARTIE.

ÉTUDE DE LA RÉPARTITION VERTICALE DE LA TEMPÉRATURE DANS LES PREMIERS MÈTRES AU-DESSUS DU SOL.

1° Méthodes employées pour la mesure de la température de l'air au voisinage du sol.

L'étude de la température de l'air au voisinage du sol soulève un problème particulier à la micrométéorologie : celui de la mesure de la température dans un espace caractérisé non seulement par un très fort gradient, mais aussi, et surtout, par une très forte variation de ce gradient en fonction de la hauteur. Il importe donc que le dispositif adopté pour les mesures ne modifie en rien la répartition des couches isothermes.

Avant tout, l'usage de *l'abri thermométrique ordinaire* doit être rejeté. La loi de la répartition des températures à l'intérieur de l'abri n'est pas la même que celle en plein air ; le thermomètre placé sous abri n'indique donc pas, en général, la température de l'air à son niveau.

La même critique s'adresse au *thermomètre fronde*, tout au moins lorsqu'on l'utilise comme d'habitude, c'est-à-dire en frondant dans un plan vertical. Certains auteurs, p. ex. M. J. P. Gassies (26) [1]), ont déterminé, à l'aide du thermomètre fronde, la température de l'air à très faible hauteur au-dessus du sol : il est à présumer qu'ils ont frondé dans un plan horizontal. Ce procédé est peu commode ; il convient aussi de signaler que, par forte insolation, les indications du thermomètre fronde au soleil peuvent présenter un écart allant jusqu'à 1° par rapport à celles obtenues à l'ombre (Alger, août et septembre 1934) ; les mesures faites à l'aide du thermomètre fronde, au soleil, ne doivent donc être acceptées que sous réserves.

Contrairement aux critiques qui lui ont été adressées, le *psychromètre à aspiration d'Assmann* paraît donner des résultats satisfaisants. D'après ces critiques, l'aspiration aurait pour effet d'amener dans le psychromètre des masses d'air provenant non seulement du niveau auquel se trouve l'ajutage, mais aussi de niveaux se trouvant au-dessus et au-dessous ; la température indiquée par le thermomètre ne serait donc pas celle du niveau de l'ajutage, mais la température moyenne d'une couche d'épaisseur non négligeable. Des expériences faites en salle close avec un dispositif analogue par MM. C. E. Brazier et L. Éblé (11) ont montré que, même à très faible hauteur au-dessus du sol (3 cm.), c'est-à-dire au niveau où le vent est le plus faible, « le brassage produit par l'aspiration ne peut apporter, dans la distribution verticale des couches d'air au-dessus de l'ajutage, des troubles supérieurs à ceux qui résultent en plein air des remous causés par le vent ou par la convection thermique ».

De même, W. Mörikofer (47) a vérifié « que les filets d'air aspirés des régions plus chaudes n'entraînent pas d'erreur sensible ».

A l'occasion de mesures thermo-électriques de variabilité de température, dont je parlerai plus tard, j'ai également vérifié que l'aspiration ne modifie pas d'une manière sensible la répartition des couches d'air, sauf peut-être dans les premiers centimètres au-dessus du sol (mesures du 1er novembre 1934 ; nébulosité 0, vent entre 1 et 2 m/s.). Une soudure thermo-électrique de très faible inertie était placée dans l'une des tubulures d'un psychromètre Assmann, l'autre tubulure étant fermée par des bouchons. Chaque série de mesures comportait 50 lectures, faites à des intervalles de 5 secondes. Les séries étaient faites, le psychromètre étant alternativement à $0^m,10$ et $1^m,50$ du sol, d'abord ventilateur en marche et écran bicylindrique en place, ensuite ventilateur arrêté et écran enlevé ; dans ce dernier cas, le couple était à l'air libre, mais à l'ombre d'un carton placé à une quinzaine de centimètres. 28 séries de mesures ont été faites ; elles ont permis de déterminer les températures moyennes suivantes :

	$0^m,10$	$1^m,50$	Δt
Soudure ventilée	20°,9	20°,7	0°,2
Soudure nue, à l'ombre.....	21°,2	21°,0	0°,2.

[1]) Les numéros entre parenthèses renvoient à l'index bibliographique, pp. 56–57

Ces nombres montrent que dans le cas de la soudure ventilée, comme dans le cas de la soudure nue, les différences entre les températures moyennes à $1^m,50$ et $0^m,10$ étaient identiques ; l'aspiration n'a donc pas modifié le profil thermique de l'air au voisinage du sol.

A. ÅNGSTRÖM (5) préconise, pour les mesures faites le jour, l'emploi de thermomètres à aspiration munis d'embouchures horizontales.

Sauf dans le cas où l'on dispose d'un psychromètre pour chaque niveau, cette dernière méthode a, comme celle du thermomètre fronde, l'inconvénient de ne pas fournir de profil instantané de la température [1]). La répartition trouvée ne correspondrait donc à la réalité que dans le cas où, à chaque niveau, la température de l'air serait rigoureusement invariable.

Il est naturel que, pour obtenir des profils instantanés, on ait tenté de déterminer la température de l'air à l'aide de thermomètres fixes, non placés sous abri, mais *protégés par des écrans appropriés* contre le rayonnement : rayonnement reçu le jour, émis la nuit. Une étude très poussée a été faite sur ce sujet par W. BUDIG (13) ; ses conclusions sont les suivantes :

Au soleil, il est impossible de mesurer la température avec précision sans ventiler le thermomètre ; au contraire, par temps couvert, même sans écran, les thermomètres donnent de bons résultats. La nuit et par ciel clair, les indications des thermomètres sont exactes, à condition que ceux-ci soit munis d'écrans circulaires en tôle d'aluminium, très brillants, de 9 cm. de diamètre, et placés à au moins 18 mm. au-dessus du réservoir.

D'après W. BUDIG, ce n'est donc que pendant la nuit que des écrans permettent l'usage de thermomètres non ventilés.

J'ai fait moi-même, à ce sujet, des mesures qui ont pleinement confirmé ces conclusions. Je me suis attaché, notamment, à rechercher une protection efficace contre le rayonnement solaire. Le thermomètre était remplacé, pour ces recherches, par l'une des soudures d'un couple thermo-électrique, l'autre soudure se trouvant dans un psychromètre à aspiration ; si l'écran étudié est efficace, les deux soudures sont à la même température, la déviation du galvanomètre est donc nulle.

L'écran indiqué par W. BUDIG, et qui porte son nom dans la littérature météorologique, s'est montré tout à fait efficace pour protéger le thermomètre contre le rayonnement nocturne ; au contraire, tous les essais de protection pendant le jour ont échoué.

Les écrans essayés, en feuille d'aluminium, étaient soit plans, soit coniques, et de différentes dimensions ; ils étaient tous à double paroi, la paroi supérieure, plus grande, protégeant l'autre contre l'échauffement par les rayons solaires ; les deux parois étaient fixées l'une à l'autre par de petites tiges de bois, mauvais conducteur de la chaleur. Malgré toutes ces précautions, la soudure placée sous écran restait toujours plus chaude que celle placée dans le psychromètre ; aucun des écrans essayés ne s'est montré efficace.

Cependant, il y a lieu de signaler un modèle d'écran, très simple, imaginé et étudié par A. BÜDEL (14), et qui, d'après l'auteur, donnerait de bons résultats même au soleil. Cet écran est semi-cylindrique et recouvre le thermomètre, disposé horizontalement, sur toute sa longueur ; il est en laiton de $0^{mm},2$ d'épaisseur, le diamètre du demi-cylindre est de 3 cm.

Disposé sur des thermomètres à minima, l'écran en question a été utilisé pour la première fois dans l'étude, faite par R. GEIGER, M. WŒLFLE et L. Ph. SEIP (34), de la répartition des températures minima nocturnes dans le massif du « Grosser Arber » (Forêt de Bavière).

Les *méthodes électriques* pour la mesure des températures sont de précieux auxiliaires du micrométéorologiste : elles sont au nombre de deux, et présentent toutes deux l'avantage de permettre des mesures très précises, à distance et à très brefs intervalles : *couples thermo-électriques* et *résistances électriques*.

L'usage des couples thermo-électriques a été introduit en Météorologie en 1875, à l'occasion de recherches sur le gradient vertical faites à l'Observatoire de Montsouris ; l'installation est désignée, dans les publications de l'époque, sous le nom de « thermomètre électrique de M. BECQUEREL » ; mais ce n'est que depuis une vingtaine d'années que cette méthode a été appliquée plus fréquemment, tout en restant réservée à des recherches spéciales faites dans les Observatoires ou Instituts météorologiques.

Les installations de couples thermo-électriques ont l'avantage d'une grande simplicité, tout au moins lorsqu'on mesure directement le courant thermo-électrique par la déviation du galvanomètre. Pour des mesures très précises, on emploie de préférence la méthode d'opposition ; dans ce cas, le courant qui parcourt le circuit thermo-électrique est excessivement faible, l'effet Joule est donc pratiquement nul, et la résistance du circuit ne varie pas. D'ailleurs, les variations de la température ambiante ont une influence minime sur la résistance du circuit, si l'on emploie le couple cuivre-constantan, un des plus usités : le cuivre a une très faible résistivité, et le constantan, un coefficient thermique pratiquement nul ; d'autre part, le pouvoir thermo-électrique de ce couple est très élevé. Je donnerai plus tard un exemple numérique montrant combien l'influence de la température sur la résistance du circuit est faible.

On peut donner aux couples thermo-électriques des dimensions très réduites, ce qui permet de les introduire sans difficultés dans certains organes de végétaux, tels que bourgeons ou épis. En outre, en réduisant le

---

[1]) Un profil ne peut jamais être rigoureusement *instantané* : les mesures successives sont toujours séparées au moins par l'intervalle de temps nécessaire à la lecture de l'instrument et à l'inscription du résultat.

volume de la soudure, on en diminue en même temps la masse calorifique et l'inertie ; la soudure suit presque instantanément les variations de température, propriété essentielle lorsqu'on étudie la microstructure de l'air. Ainsi, j'ai pu réaliser une soudure thermo-électrique dont la « masse en air » est de $0^{mg},045$, soit 35 mm^3, alors que celle d'un thermomètre à mercure à très petit réservoir (psychromètre à aspiration d'Assmann, petit modèle) est de $0^{g},14$, soit 108 cm^3 ; les « masses en air » des deux thermomètres sont donc dans le rapport d'environ 1 à 3000.

Toutefois les inerties des deux thermomètres ne sont pas dans ce même rapport. En effet, l'inertie augmente avec la « masse en air » d'un thermomètre, mais diminue avec la grandeur de la surface par laquelle son organe sensible est en contact avec l'air. Dans le cas précédent, les surfaces extérieures des deux thermomètres sont dans un rapport de l'ordre de 1 à 300 ; le thermomètre à mercure, dont la surface extérieure est par conséquent relativement plus petite, a une inertie relativement plus grande.

Il faut remarquer, d'ailleurs, que les « masses en air » indiquées ci-dessus ne sont pas la mesure d'une grandeur physique bien définie : c'est, en effet, une approximation que de considérer la masse calorifique d'une partie seulement d'un corps, telle que le réservoir d'un thermomètre, ou encore le point de soudure d'un couple thermo-électrique, sans tenir compte de la tige du thermomètre, ou des fils allant à la soudure.

Lorsque l'on veut enregistrer la température pendant un laps de temps assez long (24 heures, p. ex.), un inconvénient des mesures thermo-électriques réside dans la nécessité de maintenir à température rigoureusement constante la soudure de référence ; dans ce cas, l'usage de la glace fondante dans un vase de Dewar, lui-même soigneusement calorifugé, s'impose ; pour des mesures directes, au contraire, une bouteille Thermos ordinaire rend d'excellents services.

L'emploi du bain à température constante a été évité par plusieurs auteurs ; ainsi K. Gehlhoff (27) et W. Kühnert (44), dans leurs études sur le gradient vertical, ont disposé les deux soudures d'un même couple à des niveaux différents ; la courbe inscrite donnait donc directement la différence de température entre ces deux niveaux. Signalons aussi l'ingénieux dispositif adopté par M. Robitzsch (54) dans son étude de la variabilité de la température ; il s'agissait pour l'auteur de déterminer, non pas la température elle-même, mais seulement ses variations rapides ; la soudure de référence était, elle aussi, exposée à l'air libre, mais avait une grande masse calorifique et suivait, par conséquent, très mollement les variations de la température de l'air : ce n'est qu'après 40 min. que l'écart de température entre la soudure de référence et l'air ambiant était réduit de moitié, par vent calme. Les variations de température étudiées par M. Robitzsch ont une période de l'ordre de 3 min. ; la constance de la température de la soudure de référence est donc largement suffisante ; d'autre part, ce dispositif permet l'inscription à grande échelle, l'écart de température entre les deux soudures restant presque toujours faible.

Ce même procédé différentiel a été appliqué par W. Brückmann (12) dans son étude de la température de la surface du sol : la soudure principale se trouvait à la surface du sol, la soudure de référence était enterrée à une profondeur de 15 cm.

Une particularité des couples thermo-électriques doit être signalée ici :

Pour un grand nombre de couples que j'ai construits, la droite représentant la déviation du galvanomètre en fonction de la différence de température entre les deux soudures ne passait pas, lors du premier étalonnage, par l'origine des coordonnées ; le circuit comportait une force électro-motrice résiduelle, qui disparaissait généralement après un certain temps (quelques semaines). Il y a donc lieu de ne pas utiliser les couples thermo-électriques aussitôt après leur confection, à moins d'avoir recours à un procédé de vieillissement artificiel.

Les thermomètres à résistance ont également été utilisés pour des recherches météorologiques. Ainsi, F. Albrecht (1) a employé une résistance en fil de platine de $0^{mm},025$ de diamètre ; un diamètre aussi faible permet d'exposer le thermomètre directement au soleil : même par vent nul et forte insolation, l'écart entre la température mesurée et la température vraie de l'air n'atteint pas $0^{o},2$.

Selon W. Brückmann, les thermomètres à résistances sont exposés à moins de dérangements que les couples thermo-électriques, et les causes d'erreurs sont moins nombreuses.

2° Description du matériel utilisé.

Parmi les différentes méthodes décrites dans le chapitre précédent, j'ai surtout utilisé celle des couples thermo-électriques, qui m'a paru la plus appropriée aux recherches que j'avais en vue. La description des diverses installations réalisées, et qui répondaient à des besoins différents, fait l'objet du présent chapitre.

1° **L'installaton principale** est destinée à la mesure de la température de l'air entre le sol et le niveau de 10 m., pendant la nuit ; 15 couples thermo-électriques sont disposés aux niveaux de 5, 10, 25, 50, 75 cm. et 1 m., puis de mètre en mètre jusqu'à 10 m. ; ils sont tous munis d'écrans Budig les protégeant contre le refroidissement par rayonnement. L'installation comporte, en outre, 3 couples mesurant la température du sol à 5, 10 et 25 cm. de profondeur, enfin 3 soudures destinées à mesurer, par exemple, la température de la surface du sol dans différentes conditions d'exposition, ou encore celle de végétaux (tiges, feuilles, etc.).

Pour les raisons indiquées plus haut, j'ai adopté le couple cuivre-constantan ; les fils employés ont les caractéristiques suivantes :

Fil de cuivre : Fil souple à 20 brins de $0^{mm},2$ chacun, à double isolement caoutchouc et coton. Tous les brins sont soudés ensemble, à l'étain, quelques centimètres avant la soudure thermo-électrique ; seuls, 3 brins sont conservés pour être soudés au fil de constantan.

Fil de constantan : Fil nu de $0^{mm},6$; 2 brins sont réunis et isolés par de la gaine vernie dite « souplisseau ». Les deux brins sont soudés, à l'argent, quelques centimètres avant la soudure thermo-électrique ; un seul brin forme la soudure avec les 3 brins du fil de cuivre.

Chaque couple thermo-électrique est, par conséquent, constitué par 3 brins de fil de cuivre de $0^{mm},2$, et 1 brin de fil de constantan de $0^{mm},6$; la soudure est faite à l'argent. Le fil de constantan sert de fil de retour commun aux 21 soudures ; tous les branchements sont soudés à l'argent.

Chacune des 15 soudures cuivre-constantan aériennes est portée par une baguette de bambou horizontale, de 50 cm. de long, traversée par les fils électriques. Ces baguettes sont fixées par des colliers, aux niveaux indiqués plus haut, à une perche de bambou verticale de $10^{m},50$ de haut, composée de 6 tronçons assemblés par des douilles à baïonnette. La perche est suspendue par son extrémité supérieure à l'un des haubans d'un mât « Casanova »[1]), à une distance d'environ 80 cm. de ce mât.

Les soudures destinées à mesurer la température du sol sont protégées par des tubes de verre effilés en pointe ; les fils entrent dans le tube par une douille en laiton, et cette entrée est rendue étanche à l'eau par du brai.

J'ai donné aux fils venant des 21 soudures une longueur suffisante pour pouvoir placer les appareils de mesure à une quinzaine de mètres du pied du mât. Ils sont réunis en un câble et protégés par un tuyau de toile caoutchoutée dont les extrémités sont également fermées avec du brai.

Les 21 fils de cuivre aboutissent aux plots d'un commutateur circulaire, spécialement construit, dont la manette est reliée au galvanomètre. Un 22e plot permet de mettre le galvanomètre hors circuit pour déterminer sa position d'équilibre.

La soudure de référence, de masse et par conséquent d'inertie plus grandes, est logée dans un tube de verre plongé dans un vase de Dewar, à côté d'un thermomètre à mercure gradué en cinquièmes de degré. La pointe du tube et le réservoir du thermomètre ont été placés côte à côte. Le vase de Dewar est enfermé dans une caissette à double paroi dont l'intérieur est rempli d'ouate. Dans ces conditions, la température du liquide contenu dans le vase (eau, pétrole en hiver) varie très peu ; la température lue sur le thermomètre est bien celle de la soudure de référence.

Le galvanomètre utilisé, du type Deprez-d'Arsonval, est d'un modèle tout récent, construit par la Maison J. Carpentier. Sa particularité consiste dans sa suspension à la Cardan : ce perfectionnement permet de l'utiliser sans difficulté dans des conditions où il serait difficile d'obtenir avec précision et de conserver l'horizontalité ; l'appareil est donc particulièrement approprié aux mesures sur le terrain. Sa position de zéro est d'une constance remarquable.

Caractéristiques du galvanomètre.

Sensibilité : Déviation du spot de 1 mm., à 1 m. de distance, pour un courant de $16,4 \times 10^{-9}$ amp.
Période : $4^{s},8$.
Résistance intérieure : 33 ohms.
Résistance critique : 70 ohms.

Le galvanomètre a été fixé dans une caisse, construite à cet effet, d'environ 1 m. de long. Pour le transport, on l'immobilise à l'aide de deux vis latérales munies de contre-écrous. Du côté opposé au galvanomètre se trouvent : la source lumineuse (ampoule de $4^{v},5$), placée dans un dispositif de projection et pouvant être allumée de l'extérieur ; au-dessus, dans la paroi de la caisse, l'échelle transparente de 30 cm. de long, placée à 1 m. du galvanomètre. Le poids de l'ensemble est de 20 kg.

J'ai utilisé en premier lieu, avec ce galvanomètre, une boîte de shunt à montage Ayrton, dont les résistances ont été bobinées en fil de manganine de $0^{mm},075$, isolé à la soie (fig. 1). La résistance totale de 89 ohms,8 est constamment entre les bornes du galvanomètre (cette résistance a été choisie supérieure à la résistance critique, pour éviter que le galvanomètre ne prenne trop lentement sa position d'équilibre). Le shunt proprement dit a une résistance de 18 ohms,5 ; l'autre partie de la résistance, soit 71 ohms,3, est en série avec le galvanomètre, lorsqu'il est employé shunté (fiche en "2", fig. 1).

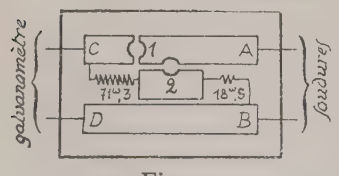

Fig. 1

J'ai effectué *l'étalonnage* en plongeant l'ensemble des soudures dans une cuve remplie d'alcool absolu porté successivement à une série de températures bien déterminées. Les points représentant la déviation du spot

[1]) Le mât « Casanova » de l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg est du modèle employé au Service radiotélégraphique de l'Armée et sert, en général, à supporter des antennes. Il est composé de 6 tubes en acier de 4 cm. de diamètre extérieur et de 2 m. de longueur utile. Trois de ces tubes servent de bas-mât, les trois autres de mât de flèche. De ce fait, le montage est très aisé et peut être facilement effectué par quatre ou même trois hommes.

en fonction de la différence de température entre les 2 soudures (16 à 18 points pour chaque couple) se rangent très sensiblement sur des droites. La déviation du spot lumineux est de $11^{mm},8$ par °C pour le circuit le moins résistant, et de $8^{mm},7$ par °C pour le circuit le plus résistant.

Il est important de vérifier que la déviation du spot est pratiquement indépendante de la température à laquelle se trouve l'installation. Le calcul montre qu'une variation de 15° pour la température des fils conducteurs du circuit le plus long se traduit par un déplacement du spot correspondant à 0°,02, lorsque le spot a sa déviation maxima de 15 cm. Or, on s'efforce toujours de maintenir la température de la soudure de référence assez voisine de celle de l'air ; l'effet thermique est, par conséquent, tout à fait négligeable.

Chacun des 21 couples thermo-électriques ayant sa courbe d'étalonnage propre, le travail de dépouillement des observations est très long ; aussi, après une première série de mesures, ai-je modifié l'installation, pour donner à chaque circuit la même déviation, soit 1 cm. par °C. Dans ces conditions, tout le travail de dépouillement se réduit à ajouter une même constante à toutes les lectures faites sur l'échelle du galvanomètre. Cette constante, positive ou négative, est égale à la différence algébrique « température de la soudure de référence moins zéro du galvanomètre ».

Au lieu de ramener l'amplitude du galvanomètre à la valeur voulue en le shuntant, il est préférable de mettre en série une résistance convenable ; celle-ci constitue la plus grande partie de la résistance de chacun des circuits et est rigoureusement invariable (résistance principale) ; l'effet thermique est donc encore diminué. D'autre part, la résistance de chaque circuit étant grande, une erreur donnée dans la détermination des résistances additionnelles ne représentera qu'une faible erreur relative par rapport à la résistance totale du circuit.

La soudure à 10 m. du sol, dont le circuit a la plus grande résistance, étant, ainsi que la soudure de référence, à températures connues, j'ai d'abord déterminé la résistance qu'il fallait intercaler dans le circuit pour obtenir la sensibilité voulue. Cette résistance, de 130 ohms, a été bobinée en fil de manganine de $0^{mm},075$, et logée dans la boîte de résistance, entre *A* et *C* (fig. 1) ; elle constitue la résistance principale. J'ai ensuite déterminé les résistances additionnelles qu'il fallait intercaler dans chacun des autres circuits pour obtenir la même sensibilité ; elles sont comprises entre 0 ohm,9 et 8 ohms,6. Pour éviter la production de courants thermo-électriques, les résistances ont été bobinées en fil de cuivre de $0^{mm},12$ de diamètre, isolé sous double couche de soie (résistance 1,6 ohm/m.). Elles ont été logées derrière le commutateur ; les extrémités des fils ont été reliées, d'une part aux plots du commutateur, d'autre part à des vis portées par des plaques d'ébonite et servant de bornes aux fils de cuivre allant aux soudures.

Après bobinage, toutes ces résistances ont été recouvertes d'une couche de paraffine, qui les soustrait à l'influence de l'humidité et améliore l'isolation électrique et thermique. En outre, toutes les bobines, y compris leurs points de connexion avec le circuit, sont enfermées dans des boîtes bien closes. De cette manière, les forces électromotrices parasites pouvant se produire aux points de contact deviennent négligeables.

Du fait de l'adjonction de la résistance principale, l'influence de la température des fils conducteurs est considérablement diminuée ; dans les conditions extrêmes indiquées plus haut, l'erreur de la mesure serait de l'ordre de 0°,005, c'est-à-dire parfaitement négligeable.

La fig. 2 montre le schéma de l'installation ; 4 circuits seulement sont représentés.

Légende :

G	Galvanomètre
C	Commutateur
S	Soudures thermo-électriques
Sr	Soudure de référence
Ram	Résistance d'amortissement
Rp	Résistance principale
Ra	Résistances additionnelles
D	Vase de Dewar
Th	Thermomètre
———	Fil de cuivre
— — —	Fil de constantan

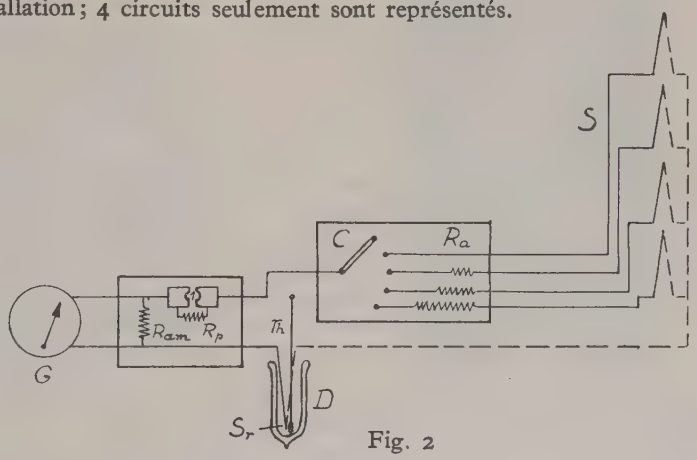

Fig. 2

La résistance principale *Rp* peut être court-circuitée à l'aide d'une fiche introduite en « 1 » ; la déviation du spot lumineux, pour une même différence de température, est alors augmentée dans le rapport de 3,82 à 1.

L'ensemble des appareils de mesure (galvanomètre dans sa caisse, boîtes de résistances, commutateur, vase de Dewar) a été logé dans une cabane démontable, construite en vue de ces expériences, de $1^{m},50 \times 2$ m. de superficie (fig. 3, planche face à p. 8). A l'exception du galvanomètre, tous les appareils sont fixés à demeure sur une petite table. Au contraire, la caisse contenant le galvanomètre doit être entièrement sous-

traite aux trépidations de la cabane; pour cela, elle est placée sur une lourde dalle de grès posée à même le sol, et qui traverse le plancher sans être nulle part en contact avec la cabane [1]).

2°. Outre le galvanomètre Carpentier, j'ai utilisé un **dispositif galvanométrique Moll,** construit par la Maison Kipp & Zonen, à Delft (Hollande), et qui est spécialement destiné aux mesures thermo-électriques de la température du sol, pour les besoins de la prospection (fig. 4, planche). Le galvanomètre est fixé contre l'un des petits côtés d'une caisse de dimensions assez réduites pour être facilement transportable; dans la paroi opposée est ménagée une ouverture qui reçoit l'échelle divisée, lue par transparence. La caisse contient en outre le dispositif d'éclairage, les accumulateurs (2 × 2 volts), un rhéostat de charge, ainsi qu'un ampèremètre et un voltmètre [2]).

Caractéristiques du galvanomètre :

Sensibilité : Déviation du spot de 1 mm., à 40 cm. de distance, pour un courant de $18{,}3 \times 10^{-9}$ amp.
Période : $1^{s}{,}28$.
Résistance intérieure : 55 ohms.
Résistance critique : 110 ohms.

Au galvanomètre est jointe une boîte de résistance à montage Ayrton, analogue à celle qui accompagne le Galvanomètre Carpentier.

Les couples thermo-électriques suivants ont été utilisés avec le galvanomètre Moll :

1° *Le couple différentiel (« couple D »)*, destiné à évaluer la différence de température entre deux points voisins. Il est constitué par deux fils de cuivre de 7 m., partant de la boîte de résistance, et dont les extrémités sont reliées par un fil de constantan de 10 m. Les fils utilisés ont les caractéristiques suivantes : *Fil de cuivre* : toron 19 brins de $0^{mm}{,}18$ de diamètre ; isolement, une couche de caoutchouc. *Fil de constantan* : toron 10 brins de $0^{mm}{,}15$ de diamètre; isolement, une couche de caoutchouc [3]). Les soudures elles-mêmes sont constituées par 4 brins de fil de cuivre et 4 brins de fil de constantan. La résistance de ce couple est de 28 ohms.

Il sert par exemple à déceler les différences de température entre les surfaces de deux terrains de nature différente, ou encore la différence de température de l'air, soit au-dessus de deux terrains différents, soit à deux niveaux différents, de nuit ou même de jour. En effet, étant donné que l'on mesure des différences de température, le rayonnement n'influence pas le résultat, à condition que les deux soudures soient à des niveaux assez rapprochés pour que la force du vent y soit sensiblement la même.

Enfin, j'ai souvent utilisé ce couple pour mesurer l'écart de température que présentent des végétaux par rapport à l'air ambiant. Pour cela, l'une des soudures était introduite dans l'organe de la plante à étudier, l'autre était mise à la place du réservoir de l'un des thermomètres d'un psychromètre à aspiration. C'est encore ce couple qui m'a servi pour l'étude de l'efficacité des écrans.

2° *Le couple à aspiration (« couple A »)*, destiné à la mesure de la température de l'air, au soleil.

J'ai dit plus haut que les écrans sont insuffisants pour protéger les thermomètres contre le rayonnement solaire ; il est par conséquent difficile d'obtenir, au soleil, un profil instantané de la température de l'air.

On doit donc avoir recours à la ventilation artificielle, mais il faut limiter cette ventilation au strict nécessaire pour ne pas perturber la stratification de l'air, notamment au voisinage immédiat du sol. Il y a lieu, par conséquent, d'employer une soudure de dimensions et de masse calorifique extrêmement réduites, qui sera placée à l'orifice d'un tube étroit ; dans ce tube, l'air aspiré acquerra une très grande vitesse, suffisante pour rendre négligeable l'effet du rayonnement solaire. Cette aspiration ne sera d'ailleurs entretenue que juste le temps nécessaire pour mettre la soudure en équilibre thermique avec l'air aspiré (3 à 4 secondes dans mon modèle). La quantité d'air aspirée pendant ce temps est très faible (de l'ordre d'un demi-litre) ; la perturbation des couches d'air est donc fortement réduite; d'autre part, une série de mesures à différentes hauteurs au-dessus du sol est faite en très peu de temps et donne un profil thermique « quasi-instantané » de l'air.

Tels sont les principes qui m'ont conduit à la construction du couple *A*.

Les fils employés sont les mêmes que ceux du couple *D*, mais la soudure servant de prise de température est constituée par un seul brin de chaque toron, et ces deux brins sont soudés à l'argent sur une longueur de $0^{mm}{,}3$ seulement. Le volume de la soudure est ainsi réduit à $0^{mm^3}{,}014$ environ. Les fils sont placés dans l'axe

---

[1]) J'adresse mes remerciements à M. Garnon, architecte de l'Université, qui m'a obligeamment fait construire cette cabane. Au cours de mes recherches, j'ai eu à ma disposition, pour tous les transports, la camionnette de l'Institut, conduite par le mécanicien M. R. Klein.

[2]) Les accumulateurs utilisés, de la marque « Exid », ont la particularité de pouvoir être renversés sans inconvénient. Ils ont été expédiés, de Delft à Strasbourg, remplis d'acide et chargés.

[3]) Ces fils ont été fournis par la Maison Plancher, à Paris ; le fil de constantan nu (p. 6) provient de la Compagnie pour la Fabrication des Compteurs à gaz, usine de Strasbourg.

Fig. 3

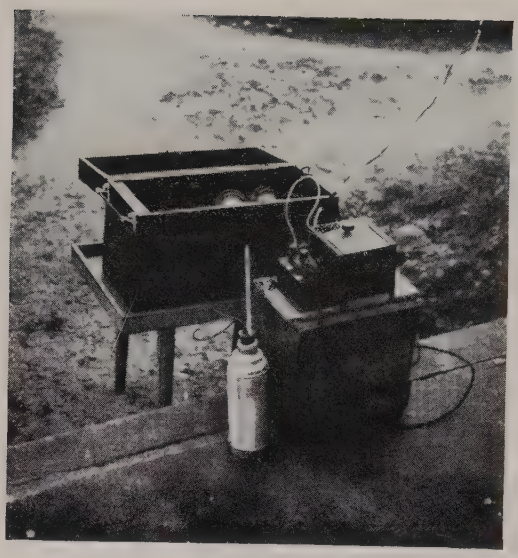

Fig. 4

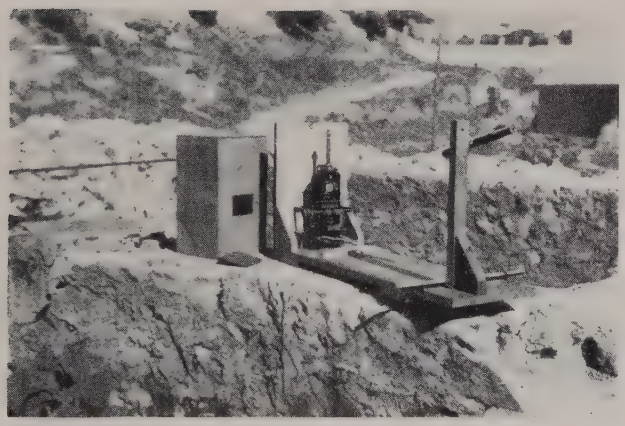

Fig. 6

Fig. 7

d'un tube de laiton de 4 mm. de diamètre et de $2^{cm},5$ de long. Sur une longueur de 1 cm. à partir de cet orifice, le tube a été aminci jusqu'à une épaisseur de $0^{mm},2$, puis poli et verni. L'autre extrémité du tube est engagée dans une baguette de bambou, d'où les fils sortent latéralement (fig. 5); ces fils ont une longueur de 12 m. A l'extrémité du fil de constantan est soudé un fil de cuivre d'environ 1 m.; cette soudure est placée dans un vase de Dewar et constitue la soudure de référence.

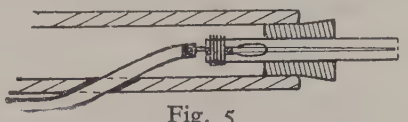

Fig. 5

A l'autre extrémité de la baguette de bambou s'adapte un tuyau de caoutchouc de 10 m., permettant d'aspirer l'air. L'aspiration est simplement faite à la bouche. Après quelques secondes d'aspiration, on voit le spot lumineux se stabiliser, la soudure ayant pris la température de l'air; c'est à ce moment précis qu'il faut faire la lecture, car le spot ne conserve cette position qu'un court instant, par suite de l'arrivée d'air ayant été en contact avec la paroi extérieure du tube.

La baguette de bambou est fixée horizontalement sur un bloc de bois coulissant le long d'un tube à gaz vertical de $2^{m},20$ de haut. A l'aide d'une ficelle passant sur des poulies, le bloc peut être manœuvré de l'intérieur de la cabane; sans quitter celle-ci, on peut donc faire varier le niveau de prise d'air entre le sol et 2 m.

Je m'étais attaché tout d'abord à protéger la soudure contre le rayonnement solaire par deux cylindres concentriques en maillechort, comme dans le psychromètre Assmann. L'expérience a montré que ce double cylindre s'échauffe trop au soleil pour qu'un courant d'air de faible durée puisse annuler son influence sur la soudure. Il a donc fallu supprimer le cylindre extérieur, et augmenter, en revanche, la ventilation.

J'ai essayé d'améliorer le dispositif en plaçant le tube à l'ombre d'un petit écran, très brillant, d'environ 2 cm^2 de surface, découpé dans une feuille d'aluminium de $0^{mm},1$ d'épaisseur. Le résultat a été le contraire de ce que j'espérais : l'écran s'échauffe fortement au soleil et se recouvre d'une gaine d'air chaud; c'est cet air qui pénètre dans le tube au moment de l'aspiration, et la soudure accuse une température trop élevée. Pour éviter tout effet de ce genre, la soudure doit être placée au ras de l'ajutage et non pas à l'intérieur du tube.

D'autre part, j'avais essayé de produire l'aspiration mécaniquement, d'abord par l'écoulement de l'eau d'un réservoir (collecteur de pluviomètre), ensuite à l'aide d'une pompe de bicyclette transformée. Ces deux procédés se sont montrés insuffisants, alors que l'aspiration par la bouche a donné de très bons résultats.

L'étude de ces différents procédés a été faite à l'aide d'un couple différentiel analogue au couple *D*, dont la soudure de référence était placée dans un psychromètre Assmann, suspendu au même niveau que le système à étudier, et assez loin du sol pour éviter les perturbations des premières couches. Seule la forme définitive du dispositif *A*, avec aspiration par la bouche, n'a donné aucune différence systématique par rapport à la soudure de référence. La différence observée était tantôt positive, tantôt négative, le plus souvent inférieure à $\pm 0°,1$, et nulle en moyenne.

Pourtant, la facilité avec laquelle la soudure *A* suit les variations de la température de l'air devient, dans une certaine mesure, un inconvénient quand il s'agit d'établir un profil thermique. En effet, aux variations lentes de la température de l'air se superposent des oscillations très rapides, dont l'amplitude est la plus grande au voisinage immédiat du sol, et qui sont éliminées automatiquement par un thermomètre d'inertie un peu plus grande. Il suffit cependant, lorsqu'on se sert du couple *A*, de déterminer le profil plusieurs fois de suite et de prendre la température moyenne pour chaque niveau.

3° *Le dispositif « BC »*, établi en vue des expériences de protection contre les gelées blanches à Barr et Colmar, dont il sera question plus loin (pp. 36 et 37).

Ce dispositif a été construit dans le but de déterminer la température des ceps; il comporte trois soudures thermo-électriques, montées en patte d'oie; le fil de constantan sert de fil de retour commun aux trois soudures. Un commutateur permet de mettre l'une ou l'autre des trois soudures en circuit, ou de déterminer le zéro du galvanomètre. Les fils conducteurs ont une longueur de 9 m.; le fil de constantan est celui qui a été utilisé pour les couples *D* et *A*, le fil de cuivre est du fil souple isolé sous caoutchouc et coton.

J'ai été obligé, par la suite, d'utiliser le galvanomètre Carpentier, à la place du galvanomètre Moll, avec les couples *D*, *A* et *BC*. Pour en rendre l'usage sur le terrain plus commode, notamment pour pouvoir travailler en pleine lumière, j'ai remplacé la lecture objective avec spot lumineux par la lecture subjective avec lunette et règle graduée.

Le galvanomètre a été fixé à l'extrémité d'une planche de 70 cm. de long; il est protégé par une boîte en bois contreplaqué. La suspension à la Cardan oblige, en effet, à le mettre à l'abri du vent. Cette boîte porte devant le miroir du galvanomètre une fenêtre, qui est fermée pendant le transport par un volet, et pendant les mesures par une glace. Le miroir concave du galvanomètre a été rendu équivalent à un miroir plan par l'adjonction d'une lentille de -2 D, fixée sur l'instrument.

A l'autre extrémité de la planche sont fixées la règle divisée, de 32 cm., et la lunette portée par un montant de 30 cm., qui peut se rabattre pour le transport. La lunette, provenant d'une boussole de topographe, a été adaptée aux visées à faible distance par l'adjonction, à l'objectif, d'une lentille de + 1 D,5 (fig. 6 et 7, planche).

La boîte de résistance est celle qui a été utilisée avec le galvanomètre Moll.

Les sensibilités des différents couples avec le galvanomètre Carpentier sont les suivantes : Sans shunt, déviation de 1 cm. pour une différence de température de 0°,55 à 0°,68, selon le couple ; avec shunt, même déviation pour une différence de température de 2°,46 à 2°,80.

3°. Pour étudier, non plus le profil instantané, mais le profil moyen de la température pendant un certain laps de temps, j'ai utilisé la méthode dite des **thermomètres permutés,** qui donne des résultats satisfaisants toutes les fois qu'un thermomètre muni d'un écran Budig indique la température vraie de l'air. 5 thermomètres sont fixés par des pinces à un support fiché dans le sol, aux niveaux de 0m,10, 0m,50, 1 m., 1m,50, 2 m. Les 5 thermomètres étant lus, chaque thermomètre est remplacé par celui qui se trouvait au-dessous de lui, et celui à 0m,10 par celui qui se trouvait à 2 m. On répète l'opération 5 fois, à 5 minutes d'intervalle. Chaque thermomètre ayant alors fourni une valeur à chaque niveau, le profil thermique est indépendant de la correction particulière à chaque thermomètre ; d'autre part, les variations accidentelles sont plus ou moins éliminées. La pratique montre qu'en terrain bien dégagé, les températures déterminées par cette méthode se rangent sur une courbe parfaitement régulière.

Les mesures qui vont être rapportées ci-après ont été effectuées, pour la plupart, en plein champ, aux environs de Strasbourg (lieu dit « Fuchs am Buckel »).

3° Étude des résultats obtenus.

Il y a lieu de distinguer deux types nettement différents de la répartition verticale de la température de l'air dans les premiers mètres au-dessus du sol :

I. Type caractéristique du jour *(« type diurne »)* : décroissance de la température à partir du sol.

II. Type caractéristique de la nuit *(« type nocturne »)* : inversion, c'est-à-dire augmentation de la température à partir du sol.

I. Type diurne.

On rencontre le type diurne toutes les fois que la surface du sol se trouve à une température plus élevée que l'air au-dessus d'elle, qu'elle lui cède par conséquent de la chaleur. Le mécanisme de ce transport de chaleur est d'ailleurs complexe et demandera une étude détaillée.

La température de l'air voisin du sol est essentiellement fonction de la température de la surface du sol ; l'étude de cette dernière est donc à la base de toute recherche relative à la température des premières couches d'air.

La température de la surface du sol — supposé tout d'abord sans végétation — est déterminée par les facteurs suivants :

1° *L'énergie rayonnée reçue par unité de surface* ; cette énergie est la somme du rayonnement solaire et du rayonnement diffus du ciel ; elle dépend de la hauteur et de l'azimut du soleil, de la nébulosité et de l'exposition de la surface.

2° *La nature et la couleur de la surface du sol,* suivant lesquelles une fraction plus ou moins élevée du rayonnement reçu est absorbée.

3° *La chaleur spécifique et la conductibilité du sol.* Une bonne conductibilité du sol a pour effet d'écouler vers les couches inférieures du sol la chaleur que reçoit la surface par rayonnement. Cette chaleur n'est pas perdue pour l'économie thermique de l'atmosphère, car elle augmente le courant thermique dirigé, la nuit, de bas en haut, et diminue le refroidissement de la surface. De même, une grande chaleur spécifique permet au sol d'emmagasiner une grande quantité de chaleur, qui sera restituée au cours de la nuit.

Lorsque le sol est très divisé (sable, gravier), ou encore, lorsqu'il a été récemment travaillé, les interstices remplis d'air empêchent, dans une certaine mesure, l'onde thermique de pénétrer à l'intérieur du sol ; la surface est donc relativement chaude [1]). Inversement un sol compact s'échauffe sur une plus grande profondeur, mais à un degré moindre.

L'échauffement du sol est également réduit lorsque celui-ci est imprégné d'eau : l'air, dans les interstices, est remplacé par de l'eau, de conductibilité bien supérieure à celle de l'air et de chaleur spécifique très élevée ; d'autre part, l'eau superficielle prend au sol la chaleur nécessaire à son évaporation. Cette dernière cause joue souvent un rôle déterminant dans l'économie thermique du sol, en raison de la grande chaleur de vaporisation de l'eau. Ceci est le cas notamment pour les sols tourbeux ou marécageux, dont l'échauffement reste toujours

[1]) Ces conditions sont réalisées artificiellement dans certains vignobles (région d'Avignon, p. ex.), où une assise pierreuse est recouverte d'une mince couche de terre végétale ; on augmente ainsi d'une façon sensible la température de la surface du sol.

relativement faible. Cette propriété, jointe au refroidissement intense qui s'y produit au cours de la nuit, y rend les gelées particulièrement fréquentes ; il y aura lieu, plus tard, de revenir sur cette question.

4° *Le brassage produit par le vent*, qui réduit dans une très forte mesure le gradient thermique dans les premières couches d'air. Il en résulte, le jour et par vent fort, une augmentation de l'énergie calorifique qui va du sol à l'air, par conséquent un abaissement de la température de la surface du sol.

En résumé, les températures au sol les plus élevées se rencontrent dans les conditions suivantes : temps clair et calme, et forte insolation ; sol sec, foncé, de faibles chaleur spécifique et conductibilité, et très divisé ; peu après le milieu de la journée.

Dans l'exemple qui sera étudié plus bas (mesures du 9 septembre 1934, à Hydra), la surface du sol a atteint la température de 51°,1, alors qu'à 1m,50, la température de l'air était de 30° ; la différence était donc de plus de 20°.

L'écart de température entre le sol et l'air à hauteur de l'abri peut atteindre des valeurs encore plus considérables, surtout dans les stations d'altitude : le rayonnement solaire y est très intense, la température de l'air libre est relativement basse, sa densité faible et sa transparence élevée.

La température de la surface du sol est aussi la température des particules d'air qui se trouvent en contact intime avec le sol. Celles-ci ne constituent en réalité qu'une très mince pellicule recouvrant le sol, de sorte que la température décroît très rapidement avec la hauteur ; en effet, la proximité du sol empêche tout mouvement vertical, ascendant ou descendant, donc tout échange de chaleur par convection ; seule la conductibilité de l'air intervient dans la propagation de la chaleur vers le haut. A quelques millimètres au-dessus du sol, l'air est par conséquent déjà notablement moins chaud que le sol. Ceci explique que l'on peut parler d'une discontinuité de température entre le sol et l'air, bien qu'il ne s'agisse en réalité que d'un gradient excessivement élevé dans les premiers millimètres de l'atmosphère.

Si seule la conductibilité moléculaire intervenait dans la propagation de la chaleur vers l'air libre, l'onde diurne serait éteinte à une hauteur de quelques mètres au-dessus du sol. Mais il s'y ajoute le transport de chaleur par suite de la convection des masses d'air (conductibilité apparente). Ces mouvements jouent, dans le transport de chaleur, un rôle dont l'importance croît avec la hauteur au-dessus du sol, pour devenir très rapidement (à partir de quelques mètres au plus) prépondérante. En effet, l'agitation tourbillonnaire qui croît avec la vitesse du vent, donc avec la hauteur, favorise le mélange des masses d'air ; les très forts gradients sont limités aux premiers décimètres au-dessus de la surface du sol qui réduit considérablement la mobilité des particules gazeuses.

Le transport de chaleur par rayonnement n'intervient pas d'une façon sensible pour l'échauffement des couches d'air voisines du sol : ni pour le rayonnement solaire, pour lequel l'atmosphère est très transparente, ni pour le rayonnement de la surface du sol, négligeable par rapport à la convection [1]).

Comme exemples de forts gradients au voisinage du sol, je donnerai les températures observées le 28 mars 1933, par ciel clair et vent de 3 m/s. Ces températures sont chacune la moyenne de 4 mesures, effectuées à l'aide du couple *A* autour de 12 h. 30 [2]) (*h* : hauteur au-dessus du sol, *t* : température).

h	0m,02	0m,05	0m,10	0m,25	0m,50	0m,75	1m,00	1m,25	1m,50	1m,75	2m,00
t	23°,5	20°,5	19°,5	18°,5	17°,8	17°,5	16°,9	16°,5	16°,0	16°,1	16°,2

La température de l'air diminue donc à partir du sol, d'abord très rapidement, puis de plus en plus lentement ; la courbe I de la figure 8 montre bien cette répartition de la température.

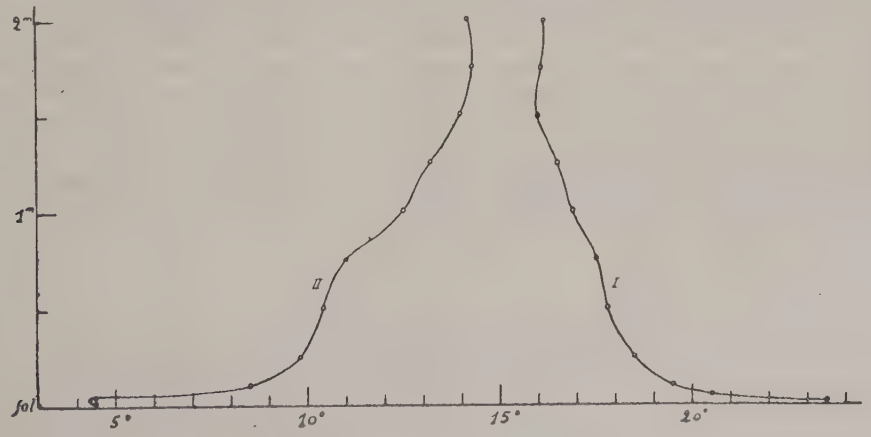

Fig. 8 : 28 mars 1933.
(I : 12 h. 30 ; II : 18 h. 15)

[1]) Ceci n'est plus vrai sur mer, où la température de la surface varie très peu au cours de la journée : ici, l'air présente une variation diurne de sa température plus forte que le substratum sur lequel il repose ; l'énergie rayonnante absorbée et émise par l'air devient donc, dans ce cas, le facteur essentiel.

[2]) Les heures sont indiquées en temps moyen local.

La décroissance est de 7°,5 entre les niveaux de 2 cm. et 2 m., ce qui correspondrait, si cette extrapolation était permise, à un gradient de 375°/hm.; entre 2 cm. et 10 cm., la diminution de température est de 4°, correspondant à un gradient de 5000°/hm. soit plus de dix fois supérieur au gradient moyen de l'ensemble de la couche.

Ces nombres n'ont rien d'exceptionnel : signalons une décroissance de température de 6° entre les niveaux de 1 mm. et 10 mm., mesurée par W. Haude (36) en plein désert ; ramenée à l'hectomètre, cette décroissance se monterait à plus de 60.000°.

D'aussi forts gradients verticaux, dépassant des milliers de fois le gradient adiabatique, témoignent d'une répartition excessivement instable des différentes couches d'air, et il semble à première vue qu'un pareil équilibre ne puisse pas s'établir, ou doive se rompre aussitôt qu'il se sera établi. Il n'en est pas ainsi :

A proximité du sol, la convection est réduite à sa forme la plus rudimentaire et consiste dans la juxtaposition de minces filets d'air chaud ascendants et d'air froid descendants ; leur existence est rendue visible par le trouble de l'atmosphère au voisinage du sol, produit par la réfraction de la lumière dans des milieux d'indices différents. Ces filets d'air sont dus à l'inégal échauffement de la surface du sol, jamais parfaitement homogène, et où les différents « versants » des mottes de terre, pierres, grains de sable, etc., présentent des expositions différentes, sont donc portés à des températures différentes. Les mouvements verticaux décrits se produisent au-dessus de toute la surface chauffée par le soleil, mais, gênés par la surface du sol, ils sont trop faibles pour déclancher un mouvement d'ensemble qui entraînerait vers l'air libre l'air surchauffé au contact du sol ; l'équilibre instable n'est donc pas rompu.

Il n'y a pas là d'exception aux lois de la thermodynamique : celles-ci s'appliquent à des gaz pouvant se déplacer librement ; au contraire les propriétés physiques de la première couche d'air découlent précisément du fait que les déplacements d'air y sont gênés par la proximité de la surface du sol (R. Geiger).

Pour qu'il y ait rupture d'équilibre, il est nécessaire qu'un fort mouvement ascendant soit déclanché par une circonstance particulière ; il se forme alors un tourbillon alimenté par les masses d'air chaud se trouvant juste au-dessus du sol. Ce tourbillon n'est visible que s'il soulève de la poussière, des feuilles mortes, etc. Si ces trombes en miniature s'observent assez rarement, cela tient, comme le dit très justement R. Geiger (28), non seulement au fait que les conditions nécessaires à leur déclanchement sont rarement réalisées, mais aussi au fait qu'en l'absence de poussières, etc., ces trombes demeurent invisibles.

Le mouvement est le plus souvent déclanché par un échauffement particulièrement intense du sol limité à une faible étendue. Ainsi R. Geiger a vu un tourbillon naître au-dessus d'un petit tas de caillasse, au bord d'une route surchauffée par le soleil : le mouvement tourbillonnaire était déclanché par le courant d'air chaud ascendant au-dessus du « versant Sud » du tas de caillasse, plus exposé au soleil que les autres versants. Une fois qu'il est formé, le tourbillon se déplace au gré du vent et subsiste tant qu'il rencontre de l'air surchauffé au sol ; cet air est entraîné dans le mouvement tourbillonnaire, auquel il donne un regain d'énergie.

Un autre exemple est cité par le même auteur, où le tourbillon a été déclanché par la composante ascendante du vent au lof d'un plateau calcaire surchauffé par le soleil.

Enfin, il y a lieu de signaler un cas assez curieux observé récemment par H. Maurer (45). Par une journée très chaude, une trentaine de fillettes couraient en rond sur une place de jeux en formant un cercle d'environ 15 m. de diamètre. Les enfants s'étant arrêtées, le mouvement de rotation imprimé à l'air par la ronde des enfants donna naissance, à l'intérieur du cercle, à un tourbillon de sable ; celui-ci suivit la circonférence, en tournant dans le sens adopté précédemment par les enfants. Après avoir parcouru environ un tiers de la circonférence, le tourbillon prit l'aspect d'une véritable colonne de sable de 5 m. de haut, très dense et absolument opaque. Il sortit alors du cercle, parcourut la place de jeux, qu'il quitta pour s'évanouir aussitôt, ne trouvant plus l'air surchauffé nécessaire à son entretien. Le phénomène avait duré en tout environ deux minutes.

La force développée par ces « trombes en miniature » est considérable : M. A. Bahard (10) décrit une pareille trombe ayant soulevé à une hauteur de 8 ou 10 mètres une cloche à melon, pesant environ 6 kg.

Les filets d'air ascendants et descendants sont caractéristiques des couches d'air immédiatement au-dessus du sol ; il en résulte qu'en un même point voisin du sol, la température doit subir de rapides variations, le point se trouvant tantôt dans un courant ascendant chaud, tantôt dans un courant descendant froid. Au contraire à un niveau plus élevé, le mélange des masses d'air est plus intime, à cause de la plus grande distance du sol et de l'influence croissante du vent. La variabilité de la température est donc très élevée au voisinage du sol, et décroît avec la hauteur.

Cette loi se trouve entièrement vérifiée par les mesures que j'ai faites au « Lotissement d'Hydra » près d'Alger. Ce terrain, situé sur l'extrémité Est du Sahel, offre des emplacements dégagés de tous côtés, par conséquent bien exposés au vent et qui ne sont pas soumis à des influences locales.

Les mesures étaient faites à l'aide du couple thermo-électrique *A*, caractérisé par la très faible inertie de sa soudure principale. Celle-ci, débarrassée de son écran protecteur, se trouvait à la place du réservoir de l'un des thermomètres d'un psychromètre Assmann. Ce dernier était suspendu successivement aux niveaux de $0^m,10$, $0^m,50$, 1 m. et $1^m,50$ (hauteur de l'ajutage). A chaque niveau, 51 lectures consécutives étaient faites à des intervalles de temps de 5 secondes, c'est-à-dire pendant 4 minutes et 10 secondes ; la moyenne des 50 différences, prises en valeur absolue, entre une mesure et la suivante, est choisie comme grandeur mesurant de la variabilité en 5 secondes.

J'ai choisi la cadence de 5 secondes comme étant la plus rapide que l'on puisse suivre facilement tout en observant la montre et en inscrivant les lectures faites ; surtout au voisinage immédiat du sol, cette cadence est beaucoup trop lente pour saisir toutes les variations de la température, souvent très rapides et suivies immédiatement de la variation inverse.

Il importait de s'assurer que les relations trouvées n'étaient pas faussées par le courant d'aspiration du psychromètre. Les mesures de contrôle citées plus haut (p. 3) ont donné, pour à la variabilité de la température, les résultats suivants :

	Variabilité en 5 sec. :	
	$0^m,10$	$1^m,50$
Soudure ventilée	$0^o,111$	$0^o,094$
Soudure nue, à l'ombre.....	$0^o,162$	$0^o,130$
Rapports.....	0,69	0,72

La variabilité est donc diminuée par suite de l'aspiration, mais elle l'est dans le même rapport aux deux niveaux ; le jour où ces mesures ont été effectuées, le rapport était de 0,7 : 1 ; il varie évidemment en fonction de la vitesse du vent. L'emploi du psychromètre est donc parfaitement admissible s'il ne s'agit d'obtenir que les rapports des variabilités aux différents niveaux ; en outre, le psychromètre donne la température vraie de l'air (à laquelle se superposent les oscillations en question).

L'étude la plus complète a été faite le 7 septembre 1934, par ciel clair et vent (à 2 m. du sol) compris entre 1 et 7 m/s. Les mesures comportaient : les 4 séries de 51 lectures aux niveaux indiqués plus haut ; la mesure du vent à l'aide d'un anémomètre Richard ; la mesure de la température de la surface du sol. L'ensemble des opérations, qui durait entre 20 et 25 minutes, était repris toutes les demi-heures, de 8 h. 30 à 18 h. : les résultats énoncés ci-après sont donc basés sur 4000 lectures de température.

Le tableau ci-dessous contient les résultats numériques tirés de ces observations.

Heure	Températures					Variabilité en 5 sec.					Temp. du sol.	Vent en m/s.
	$0^m,10$	$0^m,50$	$1^m,00$	$1^m,50$	Moy.	$0^m,10$	$0^m,50$	$1^m,00$	$1^m,50$	Moy.		
8 h. 30	27.5	26.4	25.8	26.6	26.6	0.358	0.236	0.196	0.236	0.256	»	5.9
9 h.	27.6	26.6	26.1	26.1	26.6	0.338	0.254	0.254	0.187	0.258	40.6	5.3
9 h. 30	27.8	26.5	26.9	26.3	26.9	0.368	0.331	0.298	0.210	0.301	42.6	5.0
10 h.	28.4	27.0	26.3	25.8	26.9	0.358	0.237	0.160	0.175	0.233	43.8	7.2
10 h. 30	29.3	28.1	27.5	27.5	28.1	0.318	0.305	0.179	0.177	0.245	45.8	5.6
11 h.	29.8	28.7	28.1	28.7	28.8	0.398	0.285	0.214	0.294	0.298	48.0	3.7
11 h. 30	30.4	29.3	28.8	28.8	29.3	0.499	0.390	0.290	0.250	0.357	49.0	4.7
12 h.	31.1	29.9	29.5	28.9	29.9	0.423	0.257	0.250	0.206	0.284	49.7	5.5
12 h. 30	32.7	30.6	29.7	30.0	30.8	0.590	0.361	0.242	0.298	0.373	51.1	3.7
13 h.	31.8	30.4	29.6	29.8	30.4	0.545	0.338	0.356	0.450	0.423	51.0	1.9
13 h. 30	32.7	30.5	30.1	30.4	30.9	0.593	0.374	0.360	0.305	0.408	50.6	2.5
14 h.	32.6	31.1	30.8	30.5	31.3	0.479	0.334	0.314	0.358	0.371	48.6	3.4
14 h. 30	32.5	31.4	31.3	30.7	31.5	0.479	0.378	0.390	0.338	0.396	47.7	2.7
15 h.	33.3	32.2	31.4	31.1	32.0	0.435	0.324	0.292	0.234	0.321	46.5	1.9
15 h. 30	31.5	30.6	31.5	30.9	31.1	0.355	0.383	0.288	0.264	0.322	43.8	1.4
16 h.	29.7	29.3	28.8	28.7	29.1	0.195	0.221	0.187	0.101	0.176	39.2	2.4
16 h. 30	29.2	28.5	28.2	28.2	28.5	0.273	0.162	0.125	0.135	0.174	36.8	1.7
17 h.	26.0	25.4	25.5	26.5	25.9	0.211	0.153	0.107	0.123	0.148	32.0	2.1
17 h. 30	25.5	25.3	25.0	24.7	25.1	0.067	0.071	0.064	0.043	0.061	29.5	1.4
18 h.	24.4	24.4	24.5	25.0	24.6	0.021	0.029	0.035	0.036	0.030	27.5	1.1
Moy.	29.69	28.61	28.27	28.26	28.71	0.365	0.271	0.230	0.221	0.272	»	»

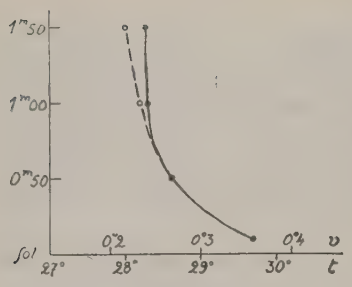

Fig. 9.

Les nombres inscrits dans la dernière ligne de ce tableau montrent que, comme la température elle-même, la variabilité de la température décroît avec la hauteur au-dessus du sol.

Ces nombres ont servi au tracé du graphique, fig. 9 (température t en trait plein, variabilité v en trait interrompu) ; l'échelle des variabilités y a été choisie de manière à faire coïncider les deux courbes aux niveaux de $0^m,10$ et $0^m,50$: comme la température elle-même, sa variabilité décroît d'abord en fonction de la hauteur ; mais en raison de l'influence du vent, elle continue à diminuer à un niveau où la température ne varie plus d'une manière sensible avec la hauteur au-dessus du sol.

La fig. 10 représente les variations, en fonction du temps, des différents éléments mesurés au cours de cette journée ; les courbes de la température de l'air et de sa variabilité sont tracées d'après les moyennes des quatre niveaux.

La courbe de la variabilité présente la même allure générale que celle de la température du sol ; ces deux courbes ont, notamment, leur maximum un peu après le milieu de la journée, alors que la température de l'air n'atteint sa plus forte valeur qu'à 15 h. D'après les travaux de M. Robitzsch (54), la variabilité est fonction surtout de l'intensité du rayonnement reçu ; il en est de même pour la température de la surface du sol, ce qui explique le parallélisme constaté.

Si l'on compare les courbes représentant la variabilité de la température et la vitesse du vent, on remarque, en outre, qu'à chaque saillant de l'une des courbes correspond un rentrant de l'autre. D'ailleurs, les accidents de la courbe de variabilité se retrouvent, mais fortement atténués, sur la courbe de la température du sol, ainsi que sur celle de la température de l'air (voir notamment les maximums de vent à 10 h., 12 h. et 16 h., les minimums à 9 h. 30 et 15 h. 30) : tout accroissement de la vitesse du vent a pour effet de mélanger les filets d'air chauds et froids, donc de diminuer la variabilité, et en même temps, d'abaisser la température de l'air et celle de la surface du sol ; car le vent amène au voisinage du sol, des masses d'air provenant des couches plus élevées, donc plus froides.

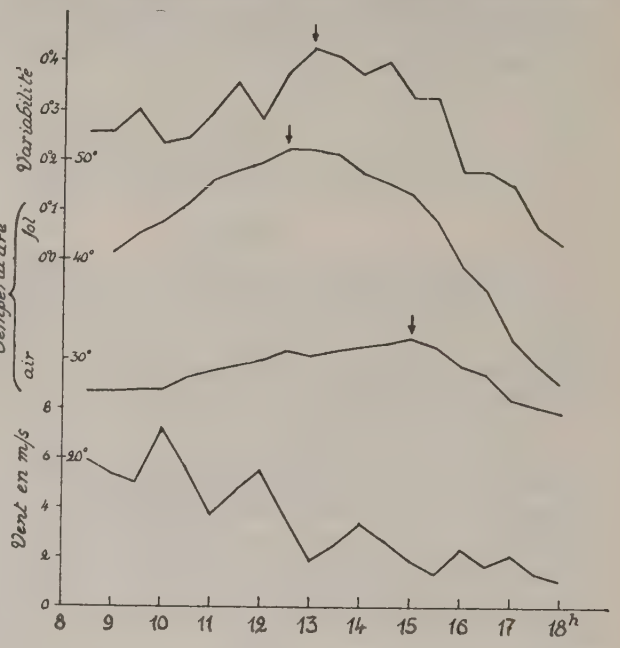

Fig. 10

La corrélation entre les courbes de variabilité et de vent eût été certainement bien meilleure s'il avait été possible de mesurer la vitesse du vent à l'aide d'un anémomètre fonctionnant pendant toute la durée des mesures (moulinet de Robinson, p. ex.) ; l'anémomètre utilisé devant être orienté à la main, la mesure du vent n'a pu être faite qu'à la fin de chaque série de mesures thermo-électriques.

Les mouvements convectifs de l'air, qui produisent ces oscillations de température, sont d'origine soit thermique (échauffement à partir du sol, maximum de variabilité à ce niveau), soit dynamique (brassage de l'air par le vent, minimum de variabilité au sol) [A. Ångström (3)]. Dans le cas étudié, la variabilité décroît de bas en haut, et il semble bien que l'effet thermique l'emporte sur l'effet dynamique. En réalité, les mesures en question, faites avec une cadence de 5 s., ne saisissent que la convection thermique, qui produit des oscillations très rapides, dont le vent tend à diminuer l'amplitude ; au contraire, le brassage par le vent produit des oscillations plus lentes, que l'étude ci-dessus ne met pas en évidence. D'ailleurs, une forte convection thermique correspond à une faible convection dynamique, et inversement.

Lorsque le sol est couvert de végétation, celle-ci intercepte une certaine fraction du rayonnement reçu ; selon la densité de la couche végétale, le maximum de température se trouve, soit à la surface du sol, soit au niveau où le feuillage, etc., est le plus dense (« *sol effectif* ») [1]. Mais dans l'un et l'autre cas, ce maximum est notablement inférieur à ce qu'il serait sur un sol nu, toutes choses égales d'ailleurs ; même si les végétaux forment une couverture bien jointive au-dessus du sol, les éléments qui sont frappés par les rayons solaires ne constituent jamais une surface comparable à celle du sol, mais se répartissent sur une certaine hauteur ; d'autre part, l'évaporation qui se produit sur les plantes absorbe une quantité non négligeable de chaleur. Pour ces raisons, le maximum n'est jamais aussi prononcé dans le cas d'un *sol effectif* que dans le cas d'un *sol réel*.

La question de l'influence de la végétation sera d'ailleurs reprise à l'occasion de l'étude de la température de l'air en forêt (III[e] partie).

[1]) La notion du *sol effectif* a été introduite en Météorologie par A. Woeïkof (63).

II. Type nocturne.

La répartition verticale de la température de l'air pendant la nuit est exactement l'inverse de celle que l'on observe le jour ; la température est la plus basse à la surface du sol et augmente avec la hauteur au-dessus du sol : il y a « *inversion de température* ».

L'inversion au sol dépasse normalement de beaucoup les premiers mètres au-dessus du sol : elle peut s'étendre jusqu'à une altitude de plusieurs centaines de mètres ; mais, comme le jour, les premiers mètres au-dessus du sol se distinguent de l'air libre par les gradients très élevés [1]) que l'on y rencontre, et qui sont les plus forts au voisinage immédiat du sol. Ainsi le 28 mars 1933, à 18 h. 15, par ciel clair et vent de 2 m/s., j'ai mesuré les températures suivantes entre les niveaux 0 et 2 m. (v. p. 11, fig. 8, courbe II) :

h	$0^m,02$	$0^m,05$	$0^m,10$	$0^m,25$	$0^m,50$	$0^m,75$	$1^m,00$	$1^m,25$	$1^m,50$	$1^m,75$	$2^m,00$
t	$4°,5$	$4°,5$	$8°,5$	$9°,8$	$10°,4$	$11°,0$	$12°,5$	$13°,2$	$14°,0$	$14°,3$	$14°,2$

On observe l'inversion nocturne toutes les fois que la surface du sol réel ou effectif est plus froide que l'air qui la surmonte. Comme pour le jour, toute étude du profil thermique nocturne se ramène donc, avant tout, à une étude de la température de la surface du sol.

Dans le cas d'un sol dépourvu de végétation, la température de sa surface est déterminée surtout par les propriétés physiques des premières couches du sol, réglant l'apport de chaleur, et par les conditions atmosphériques, réglant le rayonnement de la surface vers l'espace.

Le rôle joué par le sol pendant la nuit découle, d'une façon générale, de ce qui en a été dit dans le chapitre précédent, au sujet de la répartition diurne des températures : un faible échauffement diurne de la surface indique une grande quantité de chaleur emmagasinée dans le sol et qui sera restituée au cours de la nuit, donc un faible abaissement de température à la surface du sol. Inversement, un fort échauffement diurne de la surface entraîne un fort refroidissement nocturne. Les températures les plus basses se rencontrent par conséquent à la surface de sols secs, de faibles chaleur spécifique et conductibilité thermique, et très divisés.

Les tourbières et marécages tourbeux présentent une exception à cette règle, exception plus apparente que réelle. Car si leur sol, à cause de sa teneur en eau, présente une chaleur spécifique élevée, sa conductibilité thermique demeure malgré cela assez mauvaise à cause de sa structure fibreuse toute particulière. Par suite de cette conductibilité relativement faible, par suite, surtout, de la chaleur consommée le jour par l'évaporation à la surface (voir p. 10), le courant thermique dirigé la nuit de l'intérieur vers la surface est très réduit. La surface ne reçoit donc qu'un faible apport de chaleur et peut se refroidir fortement.

Il est évident que la teneur en eau tempère le microclimat de ces sols non seulement le jour, mais aussi, bien que dans une moindre mesure, pendant la nuit, ne fût-ce que par suite de la formation de brouillards au sol. Une tourbière sèche est donc plus exposée aux gelées qu'une tourbière marécageuse, et l'assèchement des tourbières y augmente beaucoup les risques de gelées. D'ailleurs, les tourbières et les marais sont très souvent situés dans des bas fonds, ce qui contribue à rendre les gelées fréquentes et fortes par suite de l'accumulation nocturne de l'air froid (voir II[e] partie) [2]).

Une couche de neige de quelque épaisseur a pour effet d'isoler complètement l'atmosphère du sol et de rendre ainsi les variations de la température de l'air indépendantes de la nature du sol. La conductibilité thermique de la neige, surtout de la neige fraîche, est en effet très faible. D'autre part, la neige, et encore surtout lorsqu'elle est fraîche, a un coefficient d'émission très élevé, comparable à celui d'un corps noir [3]). Pour ces deux raisons, la surface d'une couche de neige se refroidit très fortement la nuit, et il se produit au-dessus d'elle des inversions particulièrement intenses.

---

[1]) Les gradients, négatifs en cas d'inversion, sont pris ici en valeur absolue.

[2]) D'autres tourbières (par exemple, dans les Vosges, les tourbières du Reicheberg et du Gazon Martin) sont situées sur des plateaux ou sur des pentes douces, en des endroits généralement très éventés où le « climat végétal » (voir IV[e] partie) ne doit pas différer beaucoup du macroclimat. Ces tourbières sont sans doute malgré cela, à cause de l'évaporation, défavorisées par rapport aux environs.

Les tourbières plus ou moins asséchées à la suite de leur évolution naturelle constituent souvent des refuges pour des éléments d'une flore habituée à un macroclimat plus rude (exemples dans notre région : *Arnica montana* sur la Hardt près de Wissembourg ; *Empetrum nigrum* en abondance sur la tourbière du Gazon Martin ; *Pinus montana* var. *uncinata* sur la Haute-Tourbière du Beillard près de Gérardmer). Cette substitution (ou conservation ?) d'éléments floristiques est certainement due en partie aux conditions microclimatologiques, mais sans doute davantage aux conditions édaphiques.

[3]) Il s'agit ici, bien entendu, du rayonnement de grande longueur d'onde. Comme, pour un rayonnement donné, le coefficient d'absorption est égal au coefficient d'émission (loi de Kirchhoff), il s'ensuit que les conditions atmosphériques, dont l'influence sur le refroidissement nocturne va être étudiée dans l'alinéa suivant, gagnent en importance quand le sol est couvert de neige. — Pour le rayonnement solaire, une couche de neige possède, au contraire, un albédo très élevé. En conséquence, l'échauffement diurne de la surface — pour lequel d'ailleurs le point de fusion de la glace présente une limite infranchissable — sera très réduit. Il le sera encore davantage par suite du fait que la neige est, dans une certaine mesure, transparente pour le rayonnement solaire, et que, par conséquent, le rayonnement qui est absorbé ne l'est pas exclusivement à la surface. Au sujet de cette transparence, voir, par exemple, les mesures de J. E. Church, sur des thermomètres enfouis dans la neige (*Meteorolog. Zeitschrift*, XLVIII, 1913, p. 7), avec lesquelles concordent des mesures que j'ai faites moi-même, le 26 mars 1934, au Frankenthal.

Le rayonnement de la surface du sol vers le ciel est partiellement compensé par le rayonnement qu'elle reçoit, et qui est émis, d'une part, par les nuages, d'autre part, par la vapeur d'eau et l'anhydride carbonique contenus dans l'atmosphère. L'énergie perdue en définitive, que l'on appelle « *rayonnement effectif* », est la différence entre le rayonnement émis et le rayonnement reçu ; si l'on dit que les nuages, etc., « empêchent » le rayonnement de la surface du sol, on entend par là, en réalité, que le *rayonnement effectif* est diminué par leur présence.

Les rapports entre le rayonnement nocturne et les conditions atmosphériques ont été étudiés notamment par A. Ångström (7), qui a dressé un tableau indiquant, en fonction de la température et de l'humidité de l'air, le rayonnement effectif d'un corps noir, par ciel clair : le rayonnement effectif augmente avec la température (à peu près proportionnellement à T^4), mais diminue lorsque la tension de vapeur augmente. Cependant, ce n'est pas, d'après cet auteur, l'humidité des basses couches d'air qui influe sur le rayonnement effectif, mais celle des couches élevées de l'atmosphère. Si le rayonnement émis dépend de la température et de l'humidité de l'air près du sol, cela tient à ce qu'il existe entre la température et l'humidité des couches élevées et celles des basses couches une relation assez étroite *en moyenne*, mais qui peut ne pas être réalisée dans des cas individuels. — La présence de nuages diminue le rayonnement effectif proportionnellement à la nébulosité, pour des nuages d'un même niveau ; leur influence est d'autant plus sensible que leur altitude est moindre.

Des mesures faites au Sonnblick (3105^m) et citées par A. Defant (19) font comprendre le rôle que joue la vapeur d'eau contenue dans la haute atmosphère : à cette altitude, plus l'air est riche en vapeur d'eau, plus il se *refroidit* pendant la nuit ; ce refroidissement des hautes couches atmosphériques est dû, évidemment, au rayonnement de la vapeur d'eau qui y est contenue ; une partie de ce rayonnement est absorbée par le sol, où elle compense une fraction du rayonnement émis.

Le rayonnement infrarouge émis par la vapeur d'eau et l'anhydride carbonique contenus dans l'air est un rayonnement par raies spectrales ; la Terre au contraire émet son rayonnement sous forme d'un spectre continu, dont seules les longueurs d'ondes correspondant au rayonnement de la vapeur d'eau et de l'anhydride carbonique sont absorbées par ces corps. Il en résulte que la surface du sol se refroidit plus vite que l'air libre, et ceci malgré l'apport de chaleur dû au courant thermique du sol.

A l'opposé du type diurne, le type nocturne consiste en une répartition extrêmement stable des masses d'air, l'air le plus froid, donc le plus dense, se trouvant au niveau le plus bas. Il a donc pu paraître surprenant que même par temps tout à fait calme, l'inversion puisse se propager jusqu'à une assez grande hauteur, alors que la conductibilité et le rayonnement ne suffisent pas à expliquer cette propagation ; d'autre part, la convection dynamique est très faible la nuit, et la convection thermique semble devoir être nulle en raison de l'équilibre très stable des couches d'air superposées.

Des mesures faites notamment par A. Ångström (6) et W. Schmidt (55) ont montré que la convection joue, dans la propagation de la chaleur, un rôle aussi important la nuit que le jour.

L'explication de ce fait, à première vue paradoxal, a été donnée par A. Defant (20). Pour cet auteur, la convection nocturne est due aux poussières que les courants ascendants du jour ont entraînées vers les couches supérieures de l'atmosphère. Ces particules se refroidissent par rayonnement, et refroidissent l'air qui les enveloppe. Il en résulte, d'une part, un abaissement de la température de l'atmosphère, surtout dans les couches basses, très chargées de poussières (vase atmosphérique) ; d'autre part, un courant d'air froid, descendant, faible mais continu, et qui produit la convection observée.

Les mesures d'Ångström et de Schmidt paraissent infirmées par les études, plus récentes, de G. Falckenberg (25) et F. Krügler (43). Ces auteurs ont mesuré la conductibilité apparente de l'atmosphère par convection, pendant la nuit et par vent faible et régulier. Ils ont trouvé des valeurs très inférieures à celles d'Ångström (moins du dixième) ; la convection ne jouerait donc, dans les conditions indiquées plus haut, qu'un rôle tout à fait secondaire, sinon négligeable, dans l'économie thermique de la surface du sol et des premières couches d'air.

Il résulte au contraire des expériences de G. Falckenberg (24) que l'absorption et l'émission de rayonnement par les molécules gazeuses interviennent pour beaucoup dans la propagation de la chaleur. Cette propagation présente une certaine similitude avec un courant thermique (« conductibilité apparente par rayonnement ») : la portée du rayonnement est très réduite, à cause du grand pouvoir d'absorption des gaz, notamment de l'anhydride carbonique, pour ces longueurs d'ondes. La portée, généralement de quelques décamètres, n'est que de 85 cm. pour ce dernier gaz. La transmission de chaleur se fait donc de proche en proche, et la propagation est relativement lente.

Le vent a pour effet de brasser les couches d'air au-dessus du sol, donc de diminuer le gradient : il agit dans le même sens que la nébulosité.

D'après W. Kühnert (44), l'inversion au sol ne pourrait se produire que pour un vent inférieur à 7 m/s ; au delà de cette valeur, le brassage des masses d'air serait trop intense pour permettre leur répartition par ordre de températures croissantes. Une observation que j'ai faite au sommet du Grand Ballon (1420 m.) semble indiquer qu'en cas d'un sol rayonnant fortement, cette limite est trop basse (mesures du 5 juillet 1934, à 22 h. 20) : porté à bout de bras, l'anémomètre accusait un vent compris entre 6,1 et 6,9 m/s ; fiché dans le sol (coupes à 10 cm. au-dessus du sol), un vent compris entre 3,1 et 3,3 m/s ; le ciel était clair.

Les températures mesurées étaient les suivantes :

Hauteur	$0^m,10$	$0^m,50$	$1^m,00$	$1^m,50$	$2^m,00$
Température	$8°,98$	$9°,64$	$10°,04$	$10°,28$	$10°,36$

Ces nombres font ressortir une différence de température de $1°,4$ entre $0^m,10$ et $2^m,00$; le gradient n'était donc pas négligeable. Un thermomètre posé à même le sol, et dont le réservoir était en contact avec les brins d'herbe, indiquait $7°,0$.

Le tableau ci-dessous donne, en fonction de la nébulosité et du vent, et pour 3 jours consécutifs du mois de janvier 1933, les valeurs de l'inversion entre les niveaux de 5 cm. et 10 m., *au-dessus d'un champ.*

Date	*Heure*	*Nébulosité*	*Vent*	Δ :
25	17 h. 55	3	3 m/s	$1°,0$
26	17 h. 50	10	Calme	$1°,1$
27	18 h. 00	0	Calme	$5°,6$

Le plus fort écart de température entre ces deux niveaux, soit $12°,4$, a été mesuré *sur pré* le 29 mars à 18 h. 30, par vent presque calme (0,7 m/s) et nébulosité 2 (Ci) ; dans le premier mètre, l'accroissement de température était de $6°,6$, soit de plus de la moitié de l'accroissement total entre le sol et 10 m.

Les trois journées des 25, 26 et 27 janvier 1933 ont présenté des conditions très différentes quant à la répartition des températures de l'air au voisinage du sol et aux variations de ces températures avec le temps. Il est intéressant de comparer ces 3 journées entre elles.

A chacune de ces dates, et sensiblement à la même heure, la température de l'air a été mesurée pendant un quart d'heure toutes les minutes aux 10 niveaux suivants : $0^m,05$, $0^m,10$, $0^m,25$, $0^m,50$, $0^m,75$, $1^m,00$, $2^m,00$, $3^m,00$, $4^m,00$, $5^m,00$ (une lecture était faite approximativement toutes les 6 secondes) ; les valeurs ainsi déterminées sont représentées sous forme de chrono-isothermes dans les fig. 11, 12 et 13.

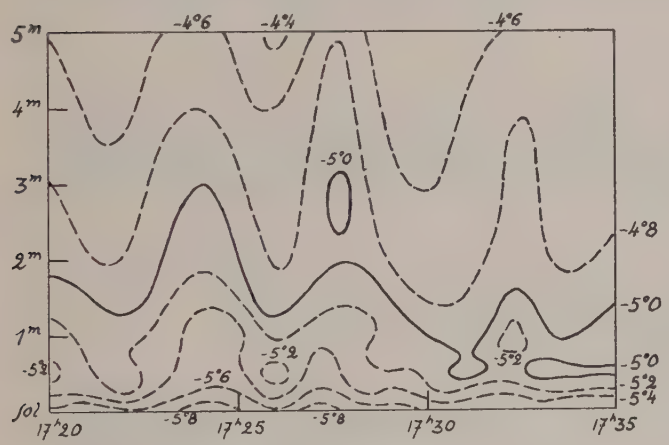

Fig. 11 : 25 janvier 1933.

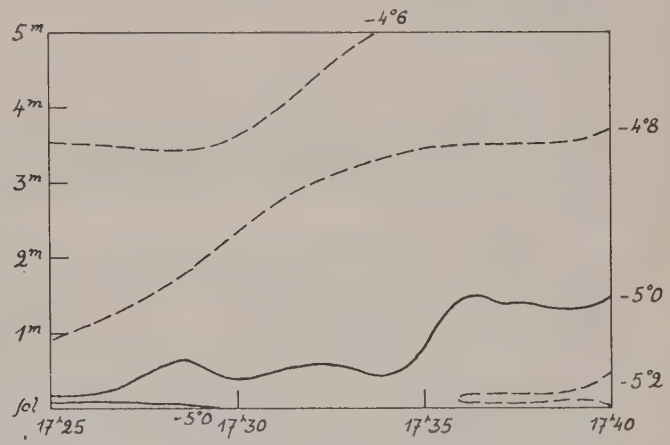

Fig. 12 : 26 janvier 1933.

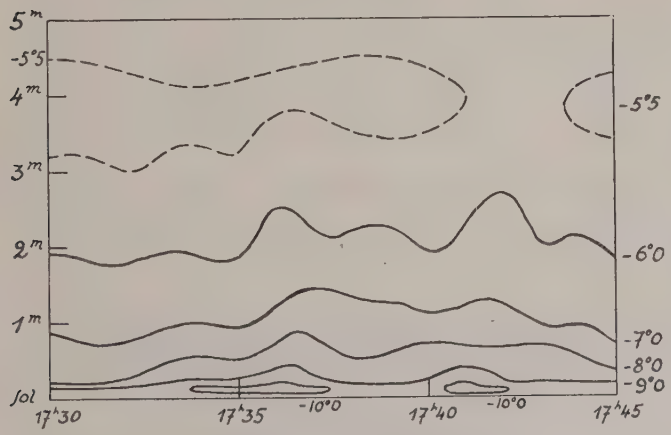

Fig. 13 : 27 janvier 1933.

La journée du 25 (fig. 11) est caractérisée par une faible nébulosité, mais par un vent de 3 m/s. Il y a un brassage continu des masses d'air de provenances et par conséquent de températures différentes. L'inversion ne dépasse pas $1°$ entre le sol et 5 m.

Le 26 (fig. 12), le ciel est entièrement couvert par des Cumulus, et le vent est calme ou presque calme. L'inversion est environ de moitié plus faible que la veille, la température de l'air est peu variable d'un instant à l'autre.

Enfin la journée du 27 (fig. 13) présente les conditions typiques pour la formation d'une forte inversion au sol : ciel clair et vent calme. L'inversion est de presque $5°$ entre le sol et 5 m. Le graphique révèle une répartition très stable des masses d'air ; on y observe nettement l'ondoiement des surfaces isothermes.

Les plus fortes inversions se rencontrent pendant la saison chaude : le sol, de température élevée, se refroi-

dit rapidement vers la fin de l'après-midi, de sorte que l'écart de température entre le sol et l'air libre prend des valeurs considérables.

Pour une saison donnée, au contraire, l'inversion est d'autant plus forte que le minimum nocturne de l'air est plus bas. Pour les nuits d'hiver claires, à Upsal, J. Juhlin (40) a déterminé la valeur ($\triangle t$) de l'inversion entre $0^m,50$ et $7^m,40$, en fonction de la température de l'air au premier de ces deux niveaux. Voici les valeurs moyennes qu'il a trouvées :

t	—3°,8	—7°,8	—11°,8	—17°,8	—21°,8
$\triangle t$	0°,6	1°,1	1°,6	2°,4	2°,9

La relation entre Δt et t est rigoureusement linéaire.

La présence d'une mince couche de végétation, à la surface du sol, a pour effet de favoriser d'une façon très sensible le refroidissement nocturne : les plantes se refroidissent par rayonnement, et l'apport de chaleur venant du sol (par les tiges) est extrêmement réduit. A l'aide de la soudure *D*, j'ai mesuré — le 25 février 1933 — après le coucher du soleil, la température de l'air à 5 cm. du sol en deux points, distants de 6 m. environ, l'un dans un champ, l'autre dans un pré. La température était toujours plus basse au-dessus du pré ; la différence entre les deux stations était généralement comprise entre 2 et 3°, mais atteignit, à un moment donné, 3°,4.

Il résulte de cette observation que les inversions sont plus fortes au-dessus des prés qu'au-dessus des champs, toutes choses égales d'ailleurs ; car il est évident que la différence de température de l'air au-dessus du sol nu et de l'air au-dessus du pré s'atténue avec la hauteur au-dessus du sol.

Cependant, il n'est pas possible de comparer entre elles, d'une manière absolument rigoureuse, les températures de l'air à très faible hauteur au-dessus d'un pré et d'un sol nu. Dans l'exemple précédent, l'herbe du pré était basse et très peu dense, de sorte que le *sol effectif*, lieu du minimum de température, y était sans doute très voisin du *sol réel* ; néanmoins les deux soudures thermo-électriques ne se trouvaient peut-être pas exactement à la même hauteur au-dessus du *sol réel* (champ) et du *sol effectif* (pré), de sorte que l'écart de température indiqué plus haut peut être entaché d'une légère erreur ; l'ordre de grandeur de la différence est certainement exact.

Des mesures très précises ont montré qu'en cas d'inversion, la température n'augmente pas d'une façon régulière à partir du sol ; au contraire, on observe, vers le niveau de 1 m., une diminution du gradient, parfois même un léger minimum relatif de la température ; cette anomalie de la répartition nocturne forme le pendant du maximum secondaire du profil diurne, découvert par Hornberger (37) et observé depuis par P. Vujević (61) et R. Geiger (29).

J'ai soumis moi-même le profil nocturne à une étude assez serrée, dans le but de déterminer les conditions dans lesquelles apparaît le minimum secondaire ou, plus généralement, l'inflexion du profil. Pour cette recherche, la méthode des thermomètres permutés s'est montrée excellente, donnant avec une très grande précision la répartition moyenne de la température pendant la durée des mesures, soit 25 minutes.

Les conclusions auxquelles j'ai abouti sont les suivantes :

L'inflexion du profil ne s'observe pas en terrain bien dégagé de tous côtés, mais seulement en forêt, à la lisière d'une forêt ou même à proximité d'arbres isolés ; dans ces dernières conditions, le profil peut affecter des formes diverses, mais présentant un caractère de grande constance. Ainsi, plusieurs séries de mesures faites dans une même soirée conduisent à des profils se modifiant à peine, mais se déplaçant du côté des basses températures ; la forme du profil, très variable d'un jour à l'autre, semble être déterminée par des lois assez complexes. En terrain dégagé, au contraire, le gradient diminue d'une manière parfaitement régulière à partir du sol.

W. Mörikofer (47) a effectué des études de profils thermiques dans la Haute-Engadine, à 2450 m. d'altitude (pâturages alpestres, sans arbres). Les résultats qu'il a obtenus méritent d'être signalés ici :

Le type nocturne s'est toujours présenté sous sa forme pure : inversion sans inflexion de la courbe ; il y a donc accord avec mes mesures.

Au-dessus d'une plaque de neige se trouvant au milieu de pâturages, l'auteur a observé, *de jour*, une distribution des températures qui découle du type nocturne : « Immédiatement au-dessus de la neige, l'air est à 0° environ ; la température s'élève rapidement, dans les premiers 10 cm. à la valeur de l'air libre ; puis, au-dessus d'une couche plus chaude encore, en vient, de 40 à 80 cm., une autre plus froide de 0°,5 que celles qui l'encadrent ».

Une anomalie semblable a été observée par W. Mörikofer au-dessus du sol chauffé par le soleil : « A une hauteur de 60 à 90 cm., toutes les observations du type diurne montrent une couche d'inversion un peu plus froide que les couches supérieure et inférieure qui l'enserrent ».

L'auteur dit ne pouvoir encore donner d'explication de ces deux phénomènes.

Le profil nocturne présente une anomalie lorsqu'il y a dépôt de rosée. Dans ce cas, la chaleur de condensation qui est libérée a pour effet d'échauffer l'air. Comme la rosée se dépose surtout au voisinage immédiat du sol, c'est là que l'échauffement est le plus sensible ; il se manifeste, sur le profil thermique, par une déviation de la courbe vers la droite.

III. Transition d'un type à l'autre.

La transition du type diurne au type nocturne ne s'effectue pas au moment du coucher du soleil, mais en général notablement plus tôt, et d'autant plus tôt que le rayonnement du sol est plus intense et l'air plus calme. En effet, le changement de type se produit au moment où la surface du sol, en se refroidissant par rayonnement, a atteint la température de l'air au-dessus d'elle. L'air, dont la température dépend de celle du sol, se refroidit lui-même, mais plus lentement que le sol ; à un moment donné, il y a donc égalité des températures.

Le tableau ci-dessous indique, pour 3 jours du mois de mars 1933, et en fonction de la nébulosité et du vent, de combien d'heures (ΔH) le changement de type a précédé le coucher du soleil.

Date	*Nébulosité*	*Vent en m/s*	ΔH
22	0	3 à 6	2
29	2 à 5	1,5	3
31	2 à 5	2,5	$1^1/_2$

J'ai obtenu ces résultats en déterminant, de demi-heure en demi-heure, le profil thermique de l'air dans les 2 premiers mètres au-dessus du sol. Le tableau suivant se rapporte à la soirée du 31 mars 1933 (coucher du soleil à 18 h. 24).

Profil N°	Heure	Hauteurs au-dessus du sol										
		0m,02	0m,05	0m,10	0m,25	0m,50	0m,75	1m,00	1m,25	1m,50	1m,75	2m,00
I	16 h.	14.0	13.8	13.1	13.1	12.7	12.7	13.2	12.4	12.1	12.1	12.1
II	16 h. 30	11.9	11.7	11.6	11.9	11.4	11.3	11.0	11.3	11.2	11.3	11.1
III	17 h.	10.2	10.6	10.8	10.9	10.8	10.8	10.8	10.9	10.8	10.8	10.8
IV	17 h. 30	8.5	9.6	10.0	10.3	10.4	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5
V	18 h.	4.2	4.1	6.1	6.7	7.1	7.3	7.6	7.6	7.3	7.9	7.8
VI	18 h. 30	1.2	1.3	2.0	4.0	5.2	5.7	5.7	5.7	5.9	6.2	6.5

Sur la fig. 14, qui représente les mêmes résultats, on suit le déplacement progressif de la courbe vers la gauche ; l'abaissement de température entre une observation et la suivante varie d'une manière irrégulière, en fonction des valeurs que prend successivement la force du vent.

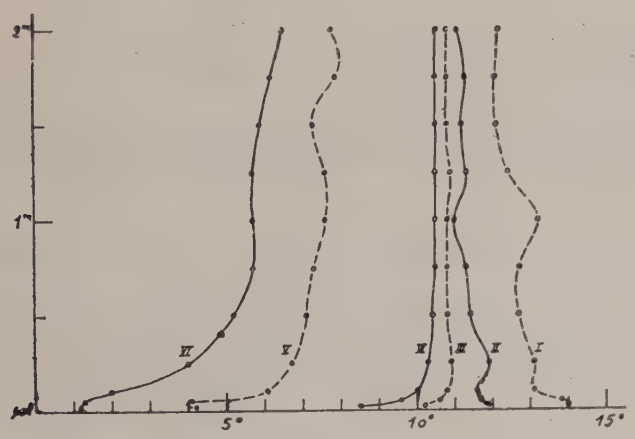

Fig. 14 : 31 mars 1933.

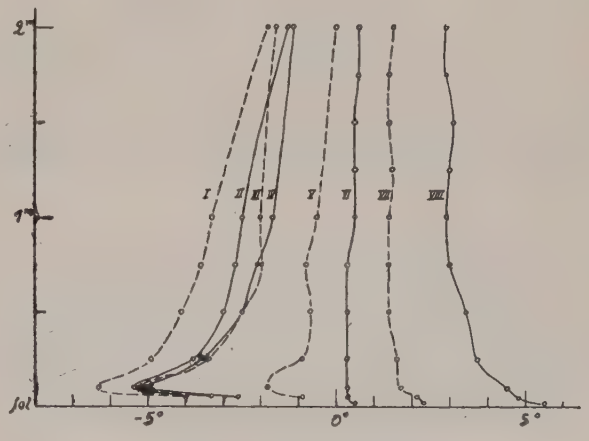

Fig. 15 : 23 avril 1933.

L'inversion au sol atteint, en général, sa plus grande valeur aux environs du coucher du soleil : localisée d'abord dans les couches immédiatement au-dessus du sol, elle gagne plus tard en hauteur, et le gradient au sol diminue de ce fait. Le coucher du soleil est aussi le moment où le rayonnement effectif du sol est le plus intense : le rayonnement solaire est nul et la température du sol est plus élevée qu'à tout autre moment entre le coucher et le lever du soleil.

D'une manière analogue, le passage inverse, du type nocturne au type diurne, n'a lieu, le matin, qu'un certain temps après le lever du soleil. Ainsi le tableau suivant relatif au matin du 23 avril 1933 (ciel clair, vent calme), montre que ce passage s'est produit vers 6 h. 30, alors que le soleil s'était levé à 5 h. (voir aussi fig. 15).

Profil N°	Heure	Hauteurs au-dessus du sol										
		0m,02	0m,05	0m,10	0m,25	0m,50	0m,75	1m,90	1m,25	1m,50	1m,75	2m,00
I	4 h.	»	−4.0	−6.3	−4.9	−4.1	−3.6	−3.3	»	»	»	−1.8
II	4 h. 30	»	−3.3	−5.4	−3.8	−3.0	−2.7	−2.5	»	»	»	−1.3
III	5 h.	»	−3.3	−5.2	−3.4	−2.5	−2.0	−2.0	»	»	»	−1.6
IV	5 h. 30	»	−2.6	−5.0	−3.6	−2.5	−2.1	−1.7	»	»	»	−1 2
V	6 h.	»	−0.9	−1.8	−0.9	−0.7	−0.8	−0.5	»	»	»	0.0
VI	6 h. 30	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6
VII	7 h.	2.3	2.1	1.7	1.6	1.4	1.4	1.4	1.5	1.4	1.4	1.5
VIII	7 h. 30	5.5	4.8	4.5	3.7	3.4	3.0	2.9	3.0	3.1	2.9	2.9

Il y a lieu de remarquer que le changement de type paraît déterminer une isothermie jusqu'à une certaine hauteur ; au contraire, avant et après ce moment, les profils thermiques sont toujours plus ou moins ondulés ; ils accusent la présence de minimums ou maximums relatifs, qui, par temps calme, se maintiennent pendant plusieurs heures au même niveau. Un pareil maximum relatif avec températures supérieures à —5°,5 se trouve, par exemple, le 27 janvier 1933, au niveau de 4 m. (fig. 13; l'inversion s'étendait au delà du niveau de 5 m.).

Les traînées de brouillard, souvent très minces, mais persistant très longtemps, matérialisent en quelque sorte et rendent visibles ces irrégularités du gradient.

La pellicule d'air chaud qui recouvre le sol pendant la nuit (fig. 15) est due à la présence d'une couche d'herbe dont les brins avaient, en moyenne, une hauteur d'environ 10 cm. : tout en arrêtant le rayonnement de la surface du sol, les brins d'herbe se refroidissent eux-mêmes fortement et déterminent le minimum de température à peu près à mi-hauteur des brins *(sol effectif)*. La couche d'air comprise entre le sol et le niveau du minimum jouit d'un microclimat spécial, plus tempéré, et comparable par son origine au climat de l'intérieur d'une forêt (voir p. 44). Au contraire, après l'établissement du type diurne, le maximum de température se trouve à la surface même du sol : le *sol effectif* se confond alors avec le *sol réel*.

Cet exemple montre que le niveau du *sol effectif* n'est pas complètement déterminé par la hauteur et la densité de la couche végétale qui recouvre le sol; il peut varier au cours de la journée. L'étude de la température de l'air en forêt le montrera d'une manière particulièrement nette.

L'effet protecteur de la couche d'herbe est mis en évidence par les nombres suivants, se rapportant à cette même journée du 23 avril 1933, à 4 h. (profil 1).

Température de la surface du sol couvert d'herbe ..... —0°,3
Température de la surface du sol nu ..... —2°,4
Température des brins d'herbe ..... —6°,5
Température de l'air à 5 cm. au-dessus du sol couvert d'herbe ..... —4°,0
Température de l'air à 10 cm. au-dessus du sol couvert d'herbe ..... —6°,3

La nuit du 22 au 23 avril 1933 a été un cas typique de gelée printanière causée par un rayonnement nocturne intense ; elle a été néfaste pour les vignobles de l'Est et du Sud-Est de la France, et, en particulier, pour le vignoble alsacien.

Il arrive que, dans des conditions particulières, le type diurne subsiste toute la nuit, ou, inversement, que le type nocturne se maintienne durant le jour.

Un exemple pour le premier cas est cité par Ramdas et Atmanathan (53) : Aux Indes, l'échauffement du sol au cours de la journée est si intense que, même au plus froid de l'année et pendant toute la nuit, le sol reste plus chaud que l'air qui est immédiatement au-dessus de lui ; l'inversion ne débute qu'à une certaine hauteur au-dessus du sol. Ainsi à Pouna, les auteurs ont observé le 29 novembre 1931, environ 45 min. avant le lever du soleil, les températures suivantes :

Surface du sol ..... 18°,1
à 25 cm. au-dessus du sol ..... 12°,5
à 1m,50 au-dessus du sol (début de l'inversion) ..... 12°,0

Dans le cas de Pouna, située au fond d'une cuvette, l'anomalie peut sans doute s'expliquer par l'afflux d'air refroidi sur les bords de la cuvette; cet air vient se poser sur un matelas d'air chaud, qui se maintient pendant toute la nuit grâce à la température très élevée du sol. Mais d'une façon générale, il paraît difficile d'attribuer uniquement à la température élevée du sol, le fait que l'inversion débute seulement à une certaine hauteur. Il serait possible que le phénomène signalé fût dû à une exagération du minimum secondaire, qui l'emporterait sur le minimum au sol ; l'explication du phénomène est encore problématique.

Le cas inverse, où le sol reste, pendant toute la journée, plus froid que l'air au-dessus de lui, a été cité par A. Woeikof (62) :

Dans les stations de haute latitude, et pendant la saison froide, les variations diurnes de la température du sol sont plus faibles que les différences de température des courants aériens ; la température de l'air est donc indépendante de la température du sol (sol réel ou sol effectif). A Pavlovsk (59°,5 N), le phénomène se présente régulièrement de septembre à avril, grâce aux vents chauds soufflant d'entre S et W ; à Tiflis (41°,5 N), au contraire, il est rare et s'observe exclusivement pendant les mois de décembre et janvier.

Les deux cas que nous venons de citer : persistance du type diurne (Pouna) et persistance du type nocturne (Pavlovsk), ne sont possibles que grâce à l'apport de masses d'air de provenances, donc de propriétés différentes : on se trouve en présence de « *microclimats dépendants* », par opposition aux « *microclimats indépendants* » dont tous les éléments sont déterminés par les conditions de température, rayonnement, etc., au lieu même des mesures [R. Geiger (32)].

Résumé.

Dans les chapitres qui précèdent, j'ai décrit les deux types de la répartition verticale de la température de l'air au voisinage du sol : décroissance de la température à partir du sol, le jour *(type diurne)* ; inversion de température, la nuit *(type nocturne)*. Des exemples montrent l'influence qu'exercent les conditions météorologiques sur le *profil thermique* de l'air, et sur l'heure à laquelle se produit la *transition d'un type à l'autre.*

J'ai étudié particulièrement les *variations rapides* de la température de l'air. D'accord avec M. Robitzsch, j'ai trouvé un *maximum de la variabilité vers le milieu de la journée,* c'est-à-dire au moment où le rayonnement reçu est le plus intense ; il y a donc sensiblement *parallélisme entre la marche diurne de la variabilité de la température de l'air et la marche de la température de la surface du sol.* Mes mesures mettent en outre en évidence l'influence qu'exerce le vent sur la variabilité : *tout accroissement de la vitesse du vent entraîne une diminution de la variabilité, en même temps qu'un abaissement des températures de l'air et du sol. La répartition verticale de la variabilité est analogue à la répartition diurne de la température : maximum au sol et décroissance avec la hauteur.* En raison de l'influence croissante du vent, *la variabilité diminue encore à un niveau où l'isothermie est pratiquement atteinte.*

Enfin, j'ai étudié la forme du *profil thermique nocturne* ; j'ai trouvé que *l'inflexion ne s'y rencontre qu'en forêt, à proximité d'une forêt, voire même à proximité d'arbres isolés* ; au contraire, *en terrain bien découvert, la température augmente régulièrement à partir du sol.*

DEUXIÈME PARTIE.

ÉTUDE DE LA RÉPARTITION DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR EN TERRAIN ACCIDENTÉ.

1° Description des travaux effectués.

J'ai montré, dans la 1re partie, l'influence qu'exercent, en terrain plan, la constitution et la couverture végétale du sol sur la température de l'air dans la première couche atmosphérique. En terrain accidenté, le relief du sol modifie d'une manière très sensible la répartition des éléments météorologiques ; aussi est-il intéressant de rechercher les lois suivant lesquelles ces différents éléments se répartissent à l'intérieur d'une région accidentée d'assez faible étendue (*microclimatologie orographique*).

J'ai porté mon choix sur la région de *Barr* (fig. 17, p. 24) pour en faire l'objet de mon étude. Cette ville est située au pied des Vosges, au débouché de la vallée de la *Kirneck* dans la plaine du Rhin (longitude 5° 6',5 E de Paris, latitude 48° 24',5 N, altitude de la Mairie 210 m.).

La région de Barr présente un double intérêt pour de telles études. Elle est d'abord intéressante au point de vue orographique. Le *Kirchberg*, montagne située au Nord de la ville et formant l'extrémité Sud du massif du Mont Ste-Odile (823 m.), domine de plus de 150 m. la plaine voisine et y descend par des pentes qui atteignent 30 % et dépassent même ce chiffre par places. Au Sud de la ville s'avance un promontoire de plus faible altitude (330 m.), dont le sommet est couvert par le bois dit *Rippelsholz*. On trouve, par conséquent, juxtaposées deux régions de caractères nettement différents : les derniers contreforts des Vosges, descendant rapidement vers la plaine du Rhin, et le bord occidental de cette plaine, en très légère pente vers l'Est. On peut donc prévoir que deux régimes différents se rencontreront en ce point et s'influenceront mutuellement.

La région en question est, d'autre part, intéressante en raison de la culture de la vigne qui y est en honneur, et qui est sa principale source de richesse. Les vignobles sont situés non seulement sur les coteaux exposés au midi, mais aussi sur des versants en pente vers le Nord, ainsi que dans la plaine. Dans ces conditions, il est intéressant, au point de vue pratique, de rechercher l'effet de l'exposition sur le rendement, en quantité et qualité, des différents vignobles.

Une étude rigoureuse du climat local, comportant notamment des mesures simultanées en un grand nombre de points, eût nécessité l'installation d'autant de stations météorologiques complètes et la collaboration d'un nombreux personnel. Des raisons d'ordre matériel et budgétaire ont empêché la réalisation d'un pareil programme. J'ai donc dû me borner à utiliser des instruments pour lesquels l'abri n'est pas indispensable, et, sinon *enregistrant*, tout au moins *conservant* leur état jusqu'au moment de la lecture : le réseau établi comportait donc uniquement des thermomètres à minimums [1]).

La répartition des températures minimums nocturnes est d'ailleurs le phénomène le plus caractéristique, au point de vue de la température, en pays montagneux ; son étude permet, en particulier, de délimiter les

[1]) Sept pluviomètres, installés dans la région étudiée, n'ont pas fourni de mesures en nombre suffisant pour permettre d'en dégager les lois relatives à la répartition de la pluie.

parcelles les plus sujettes aux gelées nocturnes. Il est certain, cependant, qu'en ne mesurant que les températures minimums, de nombreux faits échappent à l'investigation ; en particulier, il serait intéressant de pouvoir comparer entre elles les températures moyennes diurnes aux différents points du réseau.

Les mesures ont été effectuées à l'aide de 20 thermomètres à minimums construits par la Maison Meschenmoser à Strasbourg ; ils sont en verre d'Iéna, avec réservoir en fourche, division sur lame de verre opalin, et gaine de verre extérieure.

Avant leur mise en service (juin 1933), ces thermomètres ont été comparés pour une série de températures à deux thermomètres étalons, à mercure, parfaitement d'accord entre eux. En traçant les courbes de correction des différents thermomètres, on est frappé par la grande analogie qu'elles présentent entre elles : toutes les corrections diminuent fortement (en valeur algébrique) à mesure que l'on s'approche de 40° ; elles présentent souvent un maximum vers 10°. On met ce fait en évidence en calculant la courbe de correction moyenne, pour l'ensemble des thermomètres (fig. 16, courbe 1).

Une nouvelle comparaison a été effectuée au mois d'octobre 1933 ; voici ses résultats :

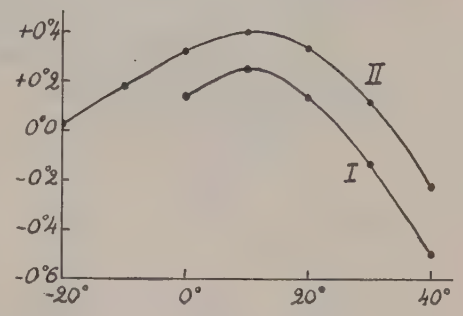

Fig. 16.

L'ordre de grandeur des corrections n'a pas changé ; de même, les différentes courbes présentent toujours la même analogie de forme, qui apparaît surtout sur la moyenne (courbe II). La comparaison avec la courbe I montre un décalage dans le sens des corrections croissantes. En appliquant la formule des trapèzes, on peut calculer, à l'aide des corrections à 0, 10, 20, 30 et 40°, une correction moyenne entre 0 et 40°, pour l'ensemble des thermomètres. Cette correction était de +0°,02 en juin, de +0°,23 en octobre ; elle a subi, par conséquent, une augmentation de +0°,2 ; autrement dit, pour l'intervalle de température de 0 à 40°, les indications des thermomètres ont diminué en moyenne de 0°,2. Pris isolément, les différents thermomètres ont varié de quantités comprises entre 0°,0 et —0°,4.

Ces très fortes variations doivent être mises sur le compte du travail moléculaire du verre. Lors de leur mise en service, ces thermomètres venaient d'être fabriqués ; le constructeur les ayant survieillis artificiellement, les corrections ont commencé par augmenter, alors qu'en général, elles tendent à devenir négatives.

Les thermomètres ont été munis d'écrans Budig (v. p. 4) ; ils ont été disposés horizontalement sur des supports en fil de fer galvanisé, piqués dans la terre, maintenant les réservoirs des thermomètres à 10 cm. au-dessus de la surface du sol.

J'ai choisi ce niveau parce que les différences des minimums y sont plus prononcées qu'à la hauteur normale de l'abri ; en outre, installés à faible hauteur au-dessus du sol, les thermomètres sont mieux à l'abri des coups de vent, comme de dégradations de la part de passants mal intentionnés.

A 10 cm. du sol, les thermomètres, qui sont protégés par les écrans contre les gouttes de pluie qui tombent, peuvent être mouillés par des gouttes rebondissant sur le sol. Si ceci se produit au moment du minimum, et que l'air n'est pas saturé à ce niveau, le thermomètre indique une température trop basse. Ces lectures erronnées doivent être rejetées ; on les reconnaît à l'écart exagéré par rapport à la température des stations voisines.

Il n'a pas été possible de conserver aux écrans leur brillant initial, nécessaire pour l'exactitude des indications thermométriques. Les écrans se sont surtout ternis par suite des traitements de la vigne au sulfate de cuivre, dont des gouttelettes tombaient forcément sur eux. Il fallait, par conséquent, évaluer l'influence de ce ternissement. Une série de comparaisons, effectuées au mois de septembre 1933, a montré qu'un thermomètre muni d'un écran oxydé marquait jusqu'à 0°,5 plus bas qu'un thermomètre muni d'un écran neuf, très brillant. En réalité, tous les écrans se sont oxydés à peu près au même degré ; les mesures faites dans les différentes stations sont donc toutes entachées de la même erreur, de sorte que la forme des courbes isothermes n'est pas altérée ; d'ailleurs, les écarts qu'il pourrait y avoir, de ce fait, entre deux thermomètres sont presque toujours beaucoup plus faibles que les différences de température d'un point à l'autre.

Mais, pour rendre les mesures comparables entre elles, il était surtout indispensable d'installer les thermomètres dans des conditions aussi identiques que possible. La plupart ont pu être placés à l'intérieur de vignobles, au pied même d'un cep ; les autres, au milieu de cultures maraîchères.

Le choix de l'emplacement des thermomètres a été déterminé, en première ligne, par des conditions orographiques, dont dépend essentiellement la répartition des minimums nocturnes ; la densité des stations est en raison directe de la déclivité du terrain ; en particulier, sur le versant du Kirchberg, une série de thermomètres, disposés à peu près suivant une ligne de plus grande pente, permet de déterminer le profil thermique de la montagne.

Une autre considération dont il fallait tenir compte, était celle de la sécurité des thermomètres ; ils ont été placés, soit dans de grands vignobles loin de tout passage (nos 2 à 16), soit dans des jardins fermés.

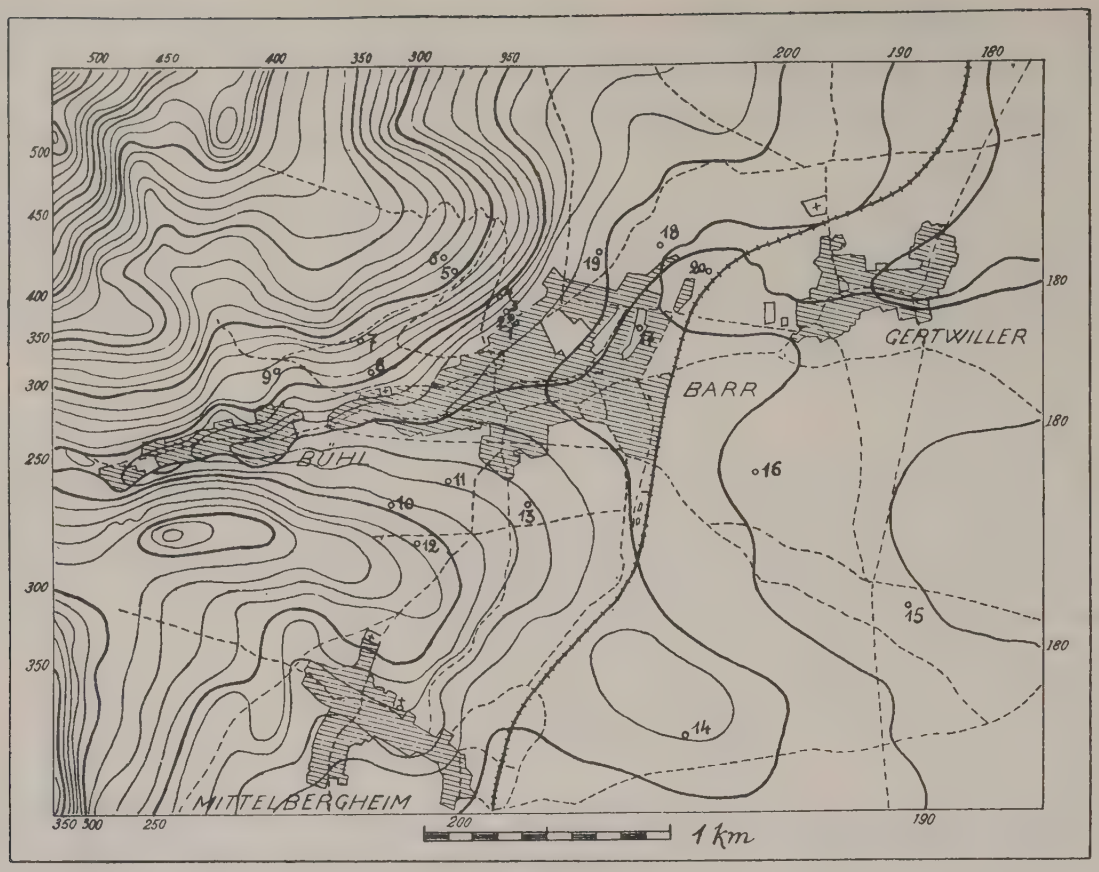

Fig. 17.

Sur les différentes cartes, les emplacements des thermomètres sont indiqués par des petits cercles ; le tableau ci-dessous donne, pour chaque station, l'altitude, ainsi que la désignation de la parcelle dans laquelle elle se trouve ; les numéros des stations sont portés sur la carte, fig. 17.

Station	*Altitude*	*Lieu*
n° 1	215 m.	Jardin Hering
2	218	Vignoble Gänsbrünnel, au pied du mur
3	220	» » bas
4	240	» » haut
5	302	» Obere Krumm-Schneck, bas
6	315	» » » haut
7	280	» Zisser, haut
8	252	» » bas
9	260	» Bubenbach
10	248	» Freiberg
11	228	» Pflœck
12	258	» Graufenkritt
13	222	» Altgasse
14	210	» Rittenei
15	182	» Lerchenberg
16	187	» Bodenfeld
17	195	Pépinière Niedere Matten
18	195	Jardin Sauermatten
19	203	» Feil
20	188	» Niedere Matten

Les thermomètres étaient relevés et remis en état tous les jours, généralement au cours de la matinée. Le trajet était, au total, d'environ 14 km. ; la partie située en plaine était parcourue à bicyclette.

Les mesures ont été effectuées au cours des mois de juin, juillet et août 1933 ; l'étude et l'interprétation des résultats obtenus font l'objet du chapitre suivant.

2° Étude et interprétation des résultats obtenus.

Mois de juin 1933. Les thermomètres ayant été mis en place le 16 juin, les mesures n'ont porté que sur une série de 11 jours, allant de 20 au 30.

Durant cette période, le ciel est resté très nuageux ou couvert ; le vent était de Sud à Ouest. Depuis le 17, d'abondantes quantités de pluie étaient tombées ; seules les journées des 25, 27, 28 et 30 en ont été exemptes. Cependant, les indications des thermomètres ne paraissent pas entachées d'erreurs du fait de la pluie (voir p. 23).

La carte fig. 18 représente les minimums moyens pour cette période.

La courbe 10°,5 englobe l'agglomération Barroise, ainsi que le bas des coteaux au Nord et au Sud de la ville. Au bas du Kirchberg, la température est restée supérieure à 11°. Au contraire, les régions situées à faible altitude, surtout celles à l'Est de la voie ferrée, accusent des minimums moyens de l'ordre de 10°. En raison du temps couvert et pluvieux, les écarts entre les différentes stations sont très faibles, tant pour chacun des 11 jours que pour leur moyenne.

Mois de juillet 1933 (fig. 19). Une période de temps nuageux et pluvieux, avec prédominance de vents d'Ouest (du 12 au 22), est encadrée de deux périodes de beau temps, sec et chaud, avec vents de Nord à Est. Le mauvais temps reprend le 29.

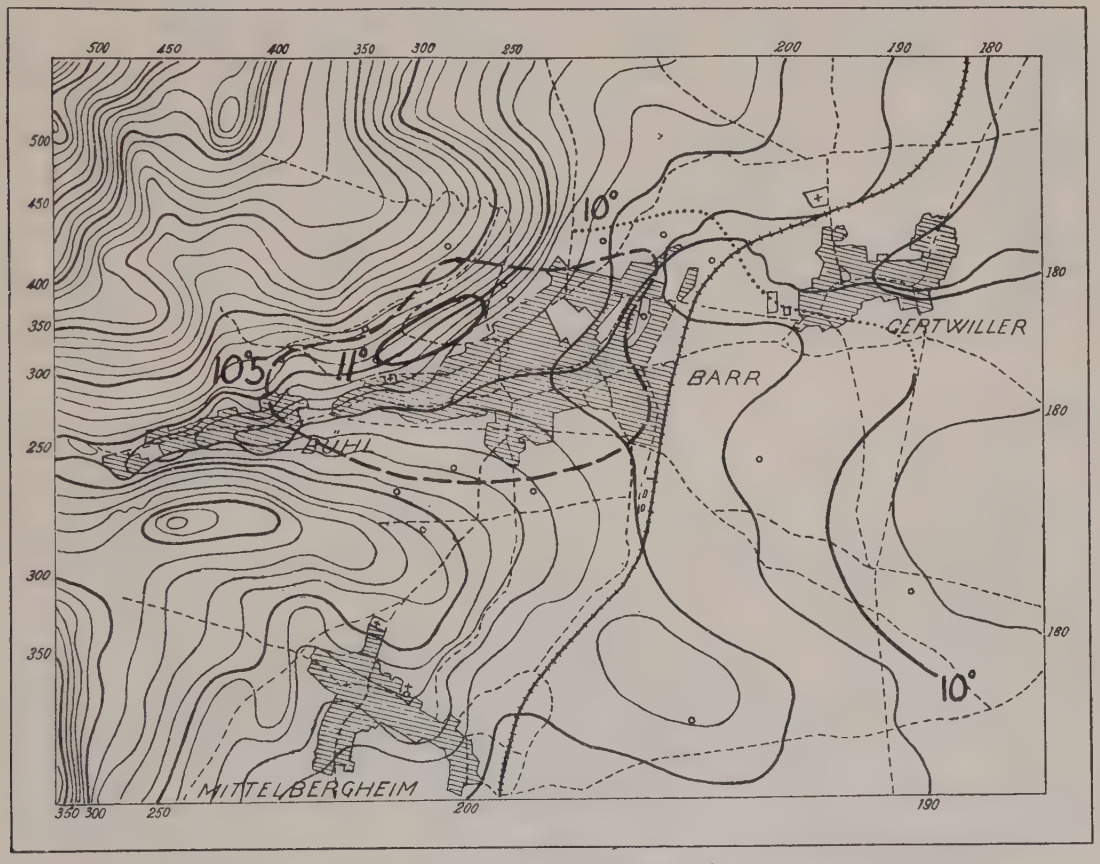

Fig. 18 : juin 1933 (11 jours).

Les minimums moyens du mois sont déduits des observations de 30 jours (pas d'observations le 21). Pour quelques stations où les observations présentaient des lacunes, les séries ont été complétées d'après les stations voisines.

Sur tout le versant du Kirchberg qui domine la ville, la température moyenne est restée supérieure à 14°. Ailleurs, les isothermes suivent assez exactement les courbes de niveau ; l'air froid s'accumule au-dessus des régions de faible altitude : basse vallée de la Kirneck, prés et jardins au Nord-Est de Barr, terres situées à l'Est de la voie ferrée.

Plusieurs journées du mois de juillet, particulièrement intéressantes, méritent d'être étudiées individuellement.

Le 1er *juillet* (fig. 20) est remarquable par les minimums exceptionnellement bas pour la saison : ils sont compris entre 3°,0 aux Niedere Matten (station 20) et 7°,7 au bas du Kirchberg (ciel entièrement clair, léger vent d'Est). La répartition des isothermes est analogue à celle des moyennes mensuelles, mais les courbes sont beaucoup plus serrées. Il est probable qu'une légère gelée blanche se soit produite, de très bonne heure, aux Niedere

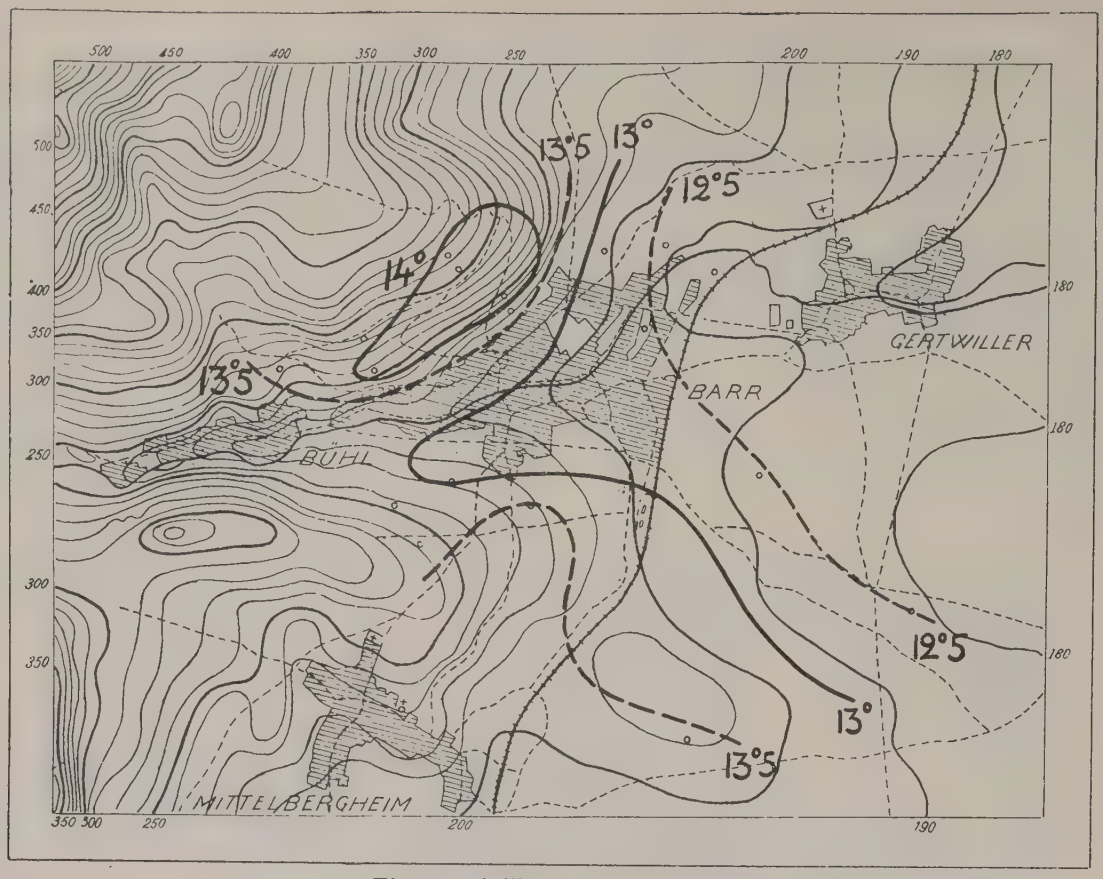

Fig. 19 : juillet 1933 (30 jours).

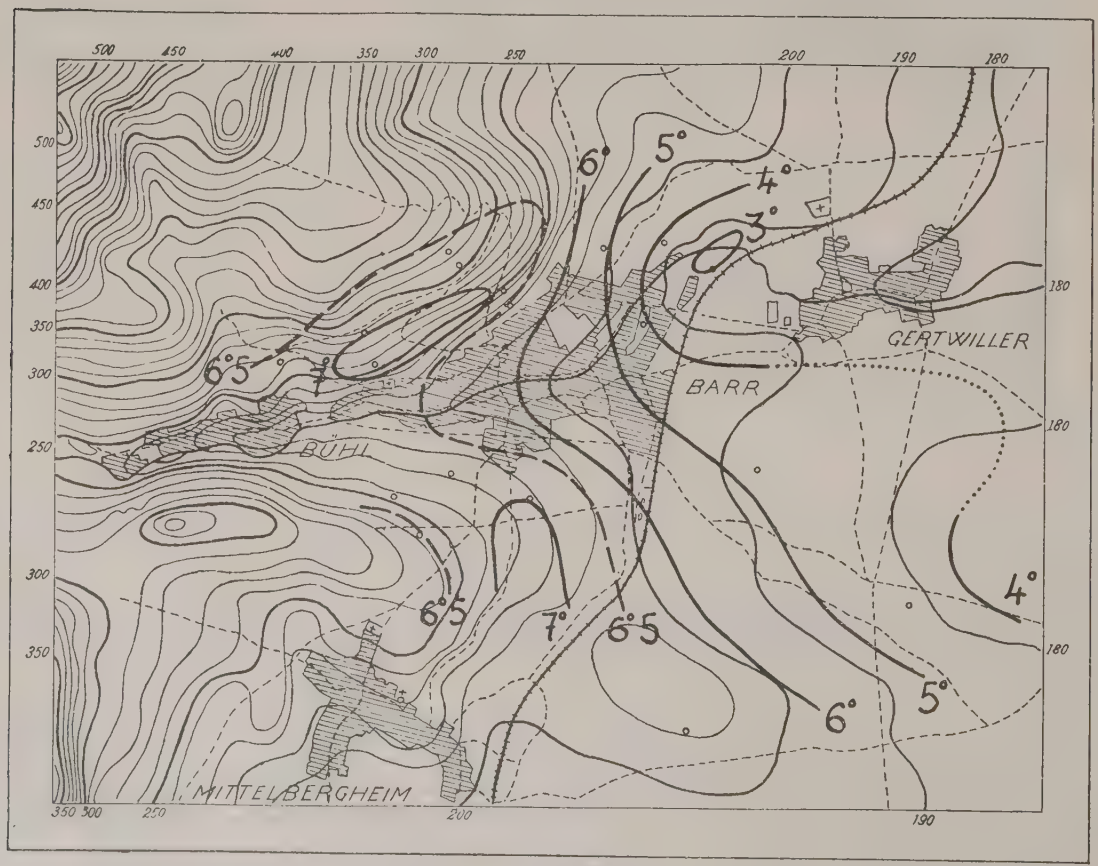

Fig. 20 : 1er juillet 1933.

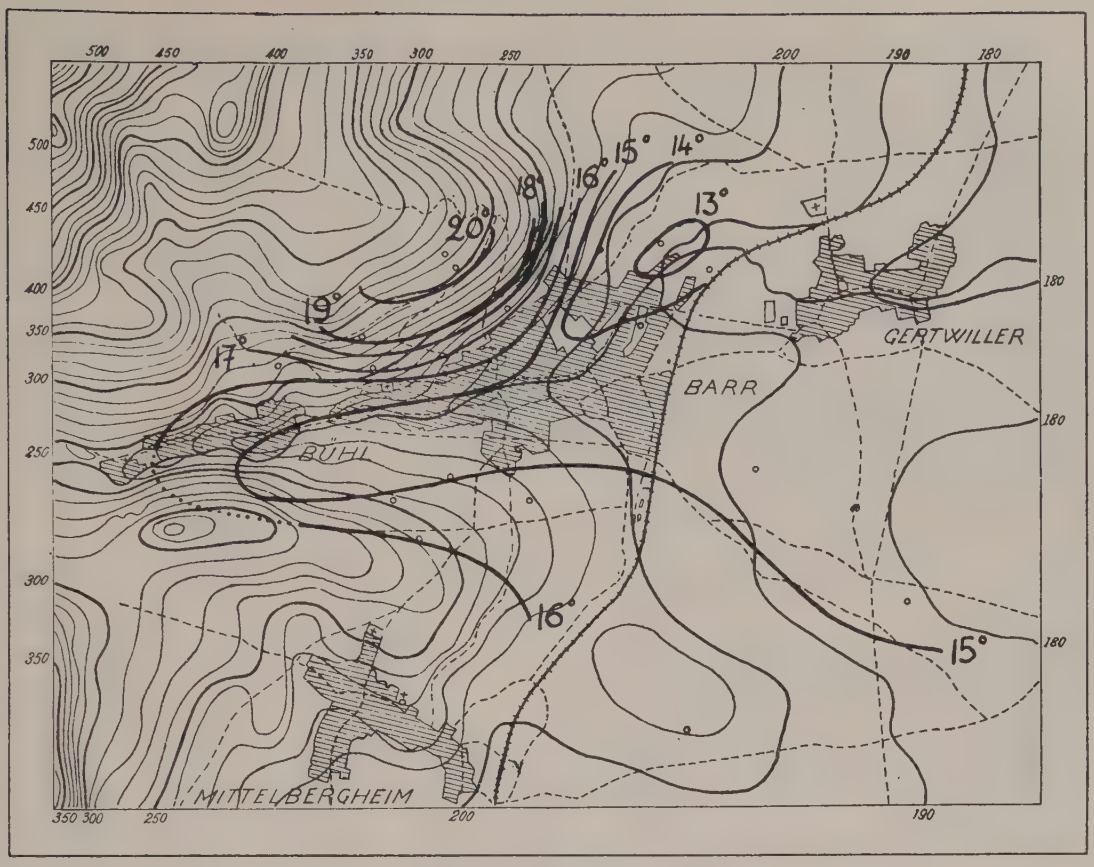

Fig. 21 : 28 juillet 1933.

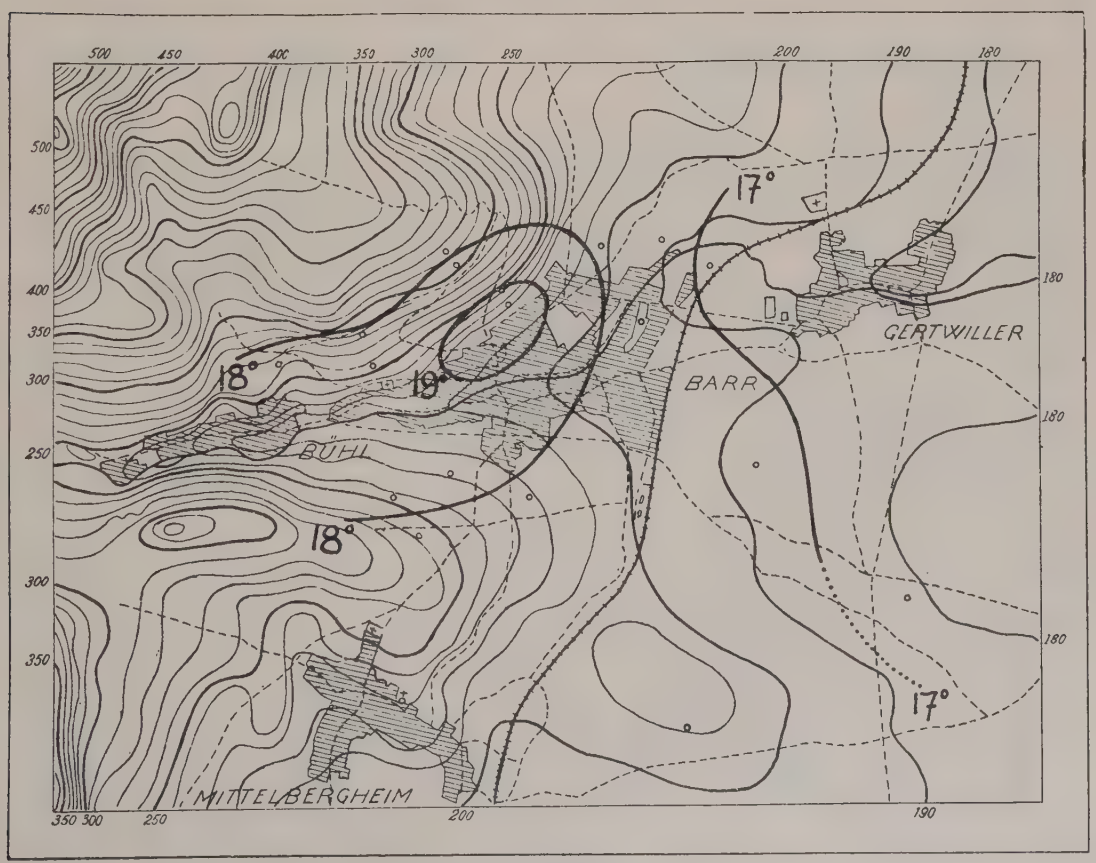

Fig. 22 : 13 juillet 1933.

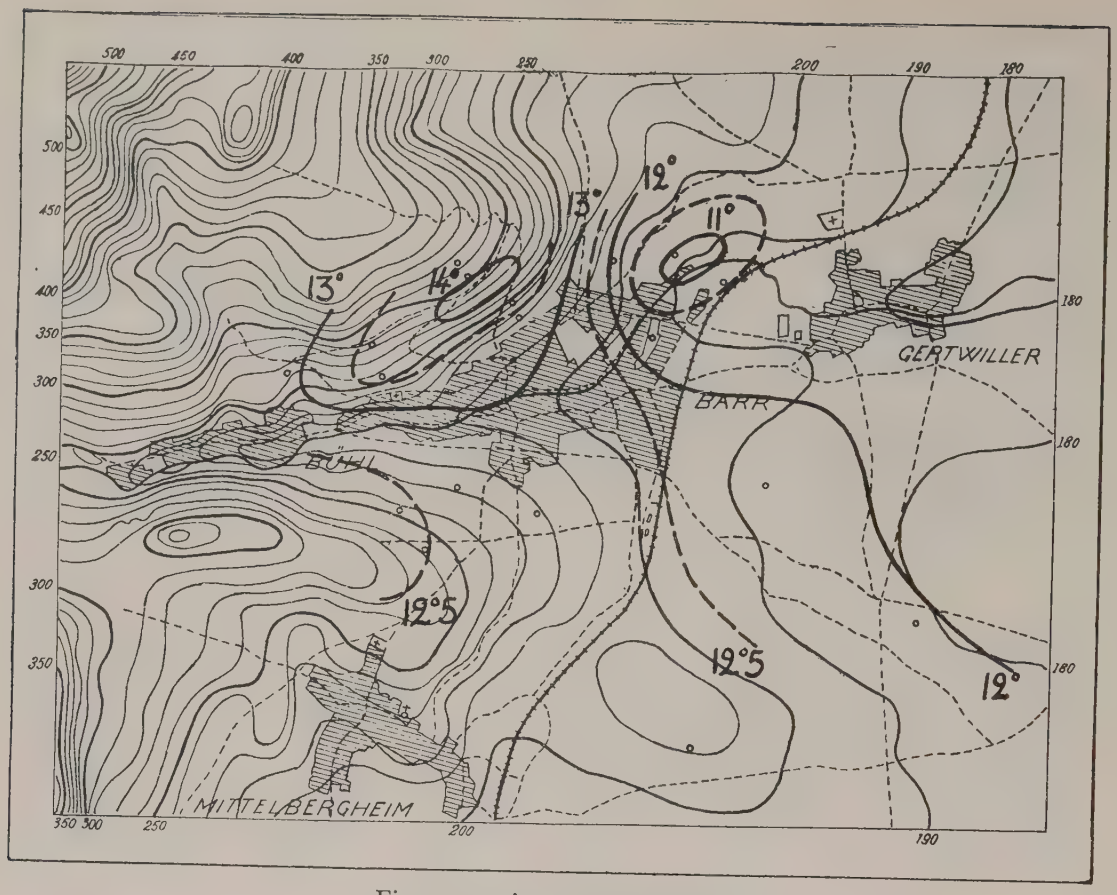

Fig. 23 : août 1933 (14 jours).

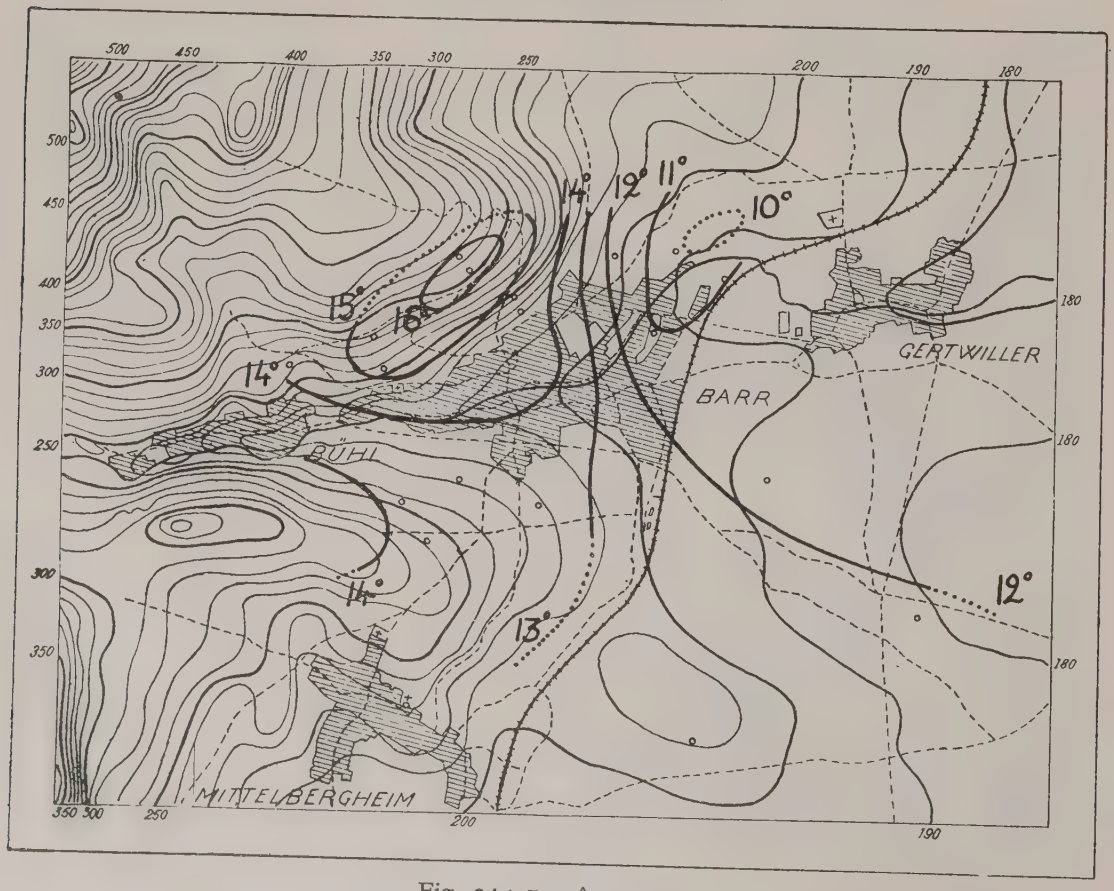

Fig. 24 : 7 août 1933.

Matten : le minimum de 3° a été mesuré dans un jardin maraîcher ; dans les prés voisins, il a certainement été plus bas. Une forte gelée blanche a été signalée ce jour au *Holzplatz*, clairière située dans la vallée de la Kirneck, à 3 km,5 en amont de Barr (altitude 340 m.).

La journée du 28 *juillet* doit être signalée à cause de ses minimums relativement élevés et des grands écarts qu'ils présentent d'un point à l'autre (fig. 21). Les deux journées précédentes avaient été claires et ensoleillées, par léger vent d'Est jusqu'au 27 à midi, vent d'Ouest ensuite. Ce vent, assez chaud, a continué toute la nuit. Le ciel étant clair, l'air s'est refroidi au voisinage du sol et accumulé dans les fonds, d'autant plus que ceux-ci étaient à l'abri du vent d'Ouest ; au contraire, ce vent balayait librement les collines. Les températures les plus élevées se rencontrent au haut du Kirchberg ; s'il y a décroissance de la température avec l'altitude, elle ne débute qu'au delà des limites du réseau thermométrique.

A celles du 28 juillet, il est intéressant d'opposer les températures lues le 14 du même mois, mais se rapportant en réalité à la *soirée du* 13 *juillet* (fig. 22). En effet, vers 21 h., un vent d'Ouest, assez fort et chaud, a fait monter rapidement la température ; il a soufflé toute la nuit, de sorte que la température s'est maintenue constamment au-dessus de la valeur qu'elle avait atteinte le soir. Au lieu de suivre, comme d'habitude, l'allure générale des courbes de niveau, les isothermes ont ici une disposition tout à fait différente : la température est restée la plus élevée au bas des coteaux au Nord et au Sud de la ville, et sur la ville elle-même. L'écoulement de l'air refroidi vers les basses régions n'a pas eu le temps de se produire ; les isothermes ont donc sensiblement la forme des courbes représentant la répartition de la température pendant le jour.

Mois d'août 1933. Les mesures n'ont porté que sur 14 jours : du 1er au 8, du 18 au 22, ainsi que les 25 et 26 ; les observations du 20 ont dû être rejetées, étant faussées par la pluie. Il a plu, en outre, le 1er, le 21 et le 22.

Les moyennes des 14 jours permettent de tracer la répartition représentée fig. 23. La température s'est abaissée le plus sur les bords de la Kirneck, en aval de la ville ; une plage de moindre abaissement se trouve à mi-hauteur du Kirchberg.

Une journée particulièrement caractéristique est celle du 7 *août* (fig. 24). Les isothermes ont une répartition analogue à celle de la moyenne des 14 jours, mais les différences sont beaucoup plus accentuées : elles dépassent 6°. Le vent était calme, le ciel en partie couvert de Cirrus.

Pendant les derniers jours du mois d'août, j'ai réparti sur le Kirchberg tous les thermomètres dont je disposais, afin de pouvoir tracer les isothermes avec plus de précision et au delà des limites du réseau primitif décrit plus haut.

Les minimums observés pendant ces jours confirment d'une manière entièrement satisfaisante les résultats obtenus précédement ; en particulier, ils montrent sans ambiguïté que la zone de moindre abaissement de la température est strictement limitée au versant de la montagne qui domine la ville de Barr ; le versant Est du Kirchberg est déjà notablement plus froid.

La répartition des températures minima nocturnes est déterminée, en première ligne, par l'écoulement de l'air froid de long des pentes et son accumulation au-dessus des régions de déclivité faible ou nulle. Il importe donc d'examiner le mécanisme de cet écoulement.

Supposons réalisées les conditions nécessaires à un rayonnement nocturne intense et à l'établissement d'une forte inversion : ciel clair et air sec, par vent calme.

En pays montagneux, l'inversion constitue, tout comme en plaine, la répartition verticale normale de la température au cours de la nuit. En plaine, cette répartition indique un équilibre stable des masses d'air ; il n'en est pas de même en montagne : l'air qui se refroidit au contact du sol se trouve au même niveau que de l'air plus éloigné du sol, qui n'est pas affecté par ce processus. L'air froid au sol tend, par conséquent, à s'écouler vers le bas ; il est remplacé, au fur et à mesure, par de l'air froid qui s'écoule le long de la pente, et aussi par de l'air plus chaud, se trouvant primitivement à une certaine distance du sol ; l'écoulement de l'air ne se fait donc pas par un courant purement laminaire, mais est accompagné de mouvements convectifs ayant pour effet de mélanger des masses d'air superposées.

Cependant ces mouvements convectifs ne jouent qu'un rôle secondaire, de sorte qu'en chaque point, les masses d'air se disposent par ordre de températures croissantes, donc de densités décroissantes à partir du sol. En particulier, on trouve au pied de la montagne une couche d'« air stagnant », qui se refroidit de plus en plus sans pouvoir s'écouler ; l'air qui descend le long des pentes rencontre par conséquent des masses d'air plus froides que lui-même, et s'étale au-dessus de ces couches.

L'écoulement de l'air froid se fait d'autant plus aisément que la déclivité du sol est plus forte ; au contraire, plus la pente est faible, plus la couche d'air froid recouvrant le sol est importante. Il s'ensuit que les surfaces isothermes, sur lesquelles s'effectue le glissement de l'air, ne sont ni parallèles à la surface du sol, ni horizontales : le long d'une pente, une surface isotherme donnée se rapproche d'autant plus du sol que la déclivité du terrain est plus forte (fig. 25).

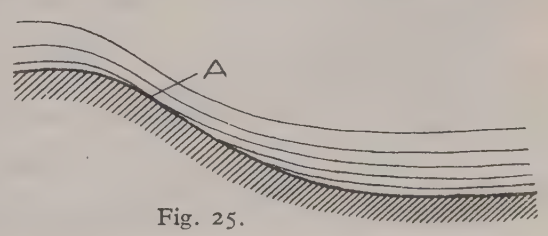

Fig. 25.

C'est ainsi que s'explique l'existence, environ à mi-hauteur des pentes, d'une zone A, où les températures minimums sont plus élevées que partout ailleurs ; durant la nuit, cette zone reste plus chaude que le pied de la montagne, et aussi plus chaude que les parties supérieures des versants.

Il faut donc se garder de pousser trop loin la comparaison, qu'on a pu établir, entre l'air froid qui se rassemble au pied d'une montagne et un liquide qui remplirait le fond d'une cuvette.

Les mesures effectuées à Barr montrent bien l'existence, à mi-hauteur du Kirchberg, de cette « *ceinture chaude* » [1]) ou « *ceinture d'optimum de température* » [2]) ; celle-ci se présente ici, il est vrai, plutôt sous forme d'une plage que d'une zone, parce que la pente présentant les meilleures conditions ne s'étend, horizontalement, que sur une largeur relativement faible.

Il est important de relever que la ceinture chaude se trouve, non pas exactement sur le versant Sud, mais en général sur le versant ayant la plus forte pente. Presque toute la montagne est couverte de vignobles, ce qui gêne peut-être l'écoulement de l'air froid et fait jouer un rôle plus important à la déclivité du terrain.

A vrai dire, la ceinture chaude se trouve, à Barr, généralement *un peu au-dessus* des pentes les plus fortes : elle est refoulée vers le haut par l'air froid qui s'accumule au pied de la montagne. Ce résultat est en accord avec ceux qui ont été obtenus au cours des expériences faites au *Grosser Arber*, dont il sera question plus loin.

La décroissance de la température minima au delà de la ceinture chaude a été assimilée à la décroissance normale de la température de l'air avec l'altitude, mais à tort. En effet, il est démontré que l'inversion nocturne peut, dans des conditions favorables, s'étendre jusqu'à plusieurs centaines de mètres au-dessus du sol, donc notablement au-dessus du niveau habituel de la ceinture chaude au Kirchberg. Comme je l'ai indiqué précédemment, cette décroissance de température s'explique par la diminution de la déclivité du terrain vers le haut de la pente.

La ceinture chaude est, en quelque sorte, la contre-partie du *lac d'air froid* qui se forme, au cours de la nuit, au pied de la montagne, et que nous étudierons maintenant.

Dans la région de Barr, et pendant les nuits claires, les températures les plus basses s'observent sur les bords de la Kirneck en aval de la ville (stations 18 et 20) ; ce sont les plus basses des terres situées à l'Ouest de la voie ferrée (Niedere Matten = prairies basses).

La partie des Niedere Matten qui environne la station 20 est connue à Barr comme étant l'endroit où se produisent les premières et les dernières gelées blanches, et où les gelées sont toujours les plus fortes. Cette particularité est due, pour une part, au grand pouvoir émissif de l'herbe des prés [3]) et à la situation des Niedere Matten au bas des pentes, très raides, du Kirchberg ; c'est d'ailleurs le seul endroit où l'air froid, en descendant les pentes de cette montagne, ne rencontre pas l'agglomération Barroise et n'est donc ni arrêté, ni chauffé par les maisons.

Mais il s'ajoute ici une circonstance spéciale, favorisant la production des basses températures : le remblai supportant la voie ferrée, qui passe à l'Est de ces prairies, forme barrage et empêche l'écoulement de l'air froid vers la plaine ; il y augmente donc le risque de gelée. Au contraire, les terres situées de l'autre côté de la voie ferrée sont protégées par le remblai contre les invasions d'air froid venant de la montagne ; les risques de gelée y sont donc moindres [4]).

Les cas analogues à celui-ci sont nombreux. L'exemple de la Forêt de Haye, près de Nancy, est classique : « Pendant l'hiver 1879-1880, la forêt de Haye fut ravagée par la gelée. Le plateau de Haye, sur lequel s'élève la forêt, est traversé par une série de vallons dont le plus important est lui-même coupé perpendiculairement à sa direction par un énorme remblai, qui donne passage à une route dont la plate-forme s'élève à 48 mètres au-dessus du fond de la vallée. Or, en faisant l'inventaire des arbres tués par la gelée, on constata que du côté d'amont la zone des arbres gelés s'élevait à partir du pied du remblai jusqu'à 20 mètres au-dessus du fond de

---

[1]) Traduction du terme anglais « *thermal belt* », créé en 1858 par Mac Dowell.

[2]) Le terme « *ceinture d'optimum de température* » est un peu long, mais correspond mieux à la réalité, et surtout ne prête pas à équivoque. En effet, c'est seulement la nuit que cette zone est moins froide que les terrains en-dessous et au-dessus d'elle, et c'est précisément pour cette raison qu'elle est particulièrement favorable aux cultures délicates, pour lesquelles elle présente les conditions optimales. C'est à peu près dans le même sens qu'on parle, dans l'histoire des climats postglaciaires, d'un *optimum de température* pendant la période Atlantique, optimum correspondant à la plus grande extension de la Chênaie mixte vers le Nord et en altitude, etc. Il est probable que cet *optimum* était dû surtout au fait que les hivers étaient plus doux qu'aujourd'hui, tandis que les étés ne différaient pas beaucoup des étés actuels ; il correspondait donc sans doute simplement à une élévation du minimum dans la variation annuelle de la température et, par conséquent, à une diminution de l'amplitude de cette variation. C'est exactement ce qui se produit dans la *ceinture chaude* en ce qui concerne la variation diurne.

On pourrait dire, avec quelque exagération, que le climat végétal de la plaine est plus continental, et celui de la *ceinture chaude*, plus maritime. — Dans le Haut-Rhin, où les terrains de plaine aussi bien que les coteaux sous-Vosgiens sont très secs, « le caractère général des formations steppiques ello-rhénanes est sarmatique, tandis que celui des collines calcaires est plutôt subméditerranéen ». (E. Issler, *Bull. Soc. Bot. de France*, LXXVIII, 1931, p. 67.)

[3]) D'après G. Falckenberg (23), le pouvoir d'absorption et d'émission d'un sol couvert d'herbe est de 0,98, donc très voisin de l'unité.

[4]) Aucun jardin fermé ne se trouvant à cet endroit, il n'a pas été possible d'y installer un thermomètre.

la vallée et qu'au contraire, du côté d'aval, pas un arbre n'était atteint. On remarqua, de plus, que la limite supérieure de cette zone gelée n'était pas parallèle au fond de la vallée, mais suivait une ligne horizontale » (21).

Cet exemple montre dans quelle large mesure un remblai peut modifier le climat local, en diminuant les risques de gelée dans les terres situées vers la plaine au détriment de celles qui sont situées du côté de la montagne.

Le même phénomène se produit souvent sur une échelle beaucoup plus petite : R. Geiger (31) cite le cas de murettes construites dans des vignobles, qui, en retenant l'air froid, faisaient geler les pieds de vigne plantés juste au-dessus.

Enfin, sur un terrain peu incliné, un simple rideau d'arbres suffit souvent à retenir l'air froid et à protéger les plantations établies plus bas ; des cultures situées juste en amont du rideau seront au contraire particulièrement exposées.

L'amplitude de l'inversion, définie par la différence de température entre le point le plus chaud (ceinture chaude) et le point le plus bas (lac froid), dépend des conditions atmosphériques. Les fortes inversions, par températures relativement basses, se produisent par temps clair et vent faible ou calme (situation anticyclonique). Ainsi, le 1er juillet 1933 (voir fig. 20), les pressions sont uniformément élevées sur toute la France, avec 1022mb,9 à Strasbourg.

Au contraire, la forte inversion du 28 juillet, par températures élevées, est due à l'invasion d'air polaire maritime, succédant à des masses d'air continental, à l'arrière d'une dépression.

Enfin, des dépressions amenant des masses d'air maritime donnent lieu à de faibles inversions.

F. D. Young (64) a mesuré en Californie une différence de température de 15° entre deux stations voisines dont les altitudes différaient de 75 m. ; cet écart considérable est dû à la grande sécheresse de l'air, qui rend très intense le rayonnement effectif pendant la nuit. La grande amplitude diurne favorise elle aussi l'établissement des fortes inversions ; ainsi, celles-ci sont particulièrement intenses après les journées chaudes et ensoleillées, lorsque les versants exposés au Sud ont été fortement chauffés par les rayons solaires.

Les recherches faites au *Grosser Arber* (Forêt de Bavière) par R. Geiger, M. Wœlfle et L. Ph. Seip (34) ont précisé les relations entre l'amplitude de l'inversion et la vitesse du vent.

Une série de thermomètres était disposée sur une pente exposée au Nord-Est, comprise entre les niveaux de 637 et 895 m. ; le vent était mesuré au bas de la pente, ainsi qu'au sommet du Grosser Arber (1447 m.), point culminant de ce massif.

La vitesse du vent en cette dernière station n'est qu'un indice de la situation générale du temps. L'amplitude de l'inversion décroît lorsque la vitesse du vent augmente. Mais la corrélation est faible entre la répartition des températures sur la pente et le vent au sommet. Au contraire, il y a une relation très nette entre l'amplitude de l'inversion et le vent mesuré au bas de la pente. Ici, le vent, qui est naturellement plus faible qu'au sommet, dépend des conditions strictement locales ; aussi la relation trouvée diffère-t-elle de celle qu'on constate pour le vent au sommet. Elle n'est semblable — un renforcement de l'inversion allant de pair avec un affaiblissement du vent — que jusqu'à une certaine valeur de l'inversion ; cette limite dépassée, la relation s'inverse, c'est-à-dire si l'inversion se renforce encore, le vent augmente également. Le vent auquel on a affaire ici est évidemment le flux d'air froid descendant le long des pentes ; il est d'autant plus intense que l'inversion est plus forte (vitesses allant jusqu'à 1,5 m/s). Entre ce courant froid et la brise de montagne, il n'y a qu'une différence d'échelle.

L'inversion nocturne est due le plus souvent à une stratification des couches d'air, qui se répartissent par ordre de densités décroissantes à partir du sol ; elle peut aussi être produite, ou tout au moins intensifiée, par l'arrivée de masses d'air chaud, qui s'étalent sur l'air froid accumulé au-dessus de la plaine. Ce cas s'est produit à Barr, le 28 juillet 1933 (v. p. 29) ; il a de même été observé près de Vienne (Autriche) par W. Schmidt (56). Un réseau micrométéorologique avait été établi sur le versant oriental du massif du *Wiener Wald* et sur la plaine attenante. Un vent d'Ouest chaud, franchissant cette montagne, produisit une forte inversion, avec brusque et forte hausse de température à la limite des deux masses d'air. En effet, l'air amené par le courant d'Ouest, après avoir franchi la crête, descendait et s'échauffait adiabatiquement. La courbe inscrite par le thermomètre enregistreur placé à mi-pente présentait de nombreuses et fortes dentelures, correspondant à des oscillations de l'altitude de la surface de discontinuité.

En cas de forte inversion, une brusque augmentation du vent a pour effet de mélanger les masses d'air superposées, donc d'élever la température de l'air au voisinage du sol. Ce cas se produit fréquemment, d'après F. Mierdel (46), au barrage de la Möhne (Westphalie). A cause de la situation très encaissée de cette station, la température y présente une grande amplitude diurne. Au cours de la nuit, il se produit souvent une élévation subite de la température, de 2 à 3° en moyenne, mais pouvant exceptionnellement atteindre 11°. Ce phénomène s'observe surtout pendant les nuits claires et calmes ; la hausse de température, qui est d'autant plus importante que l'insolation a été plus forte la veille, se produit au moment où la force du vent augmente.

L'influence de la configuration du sol sur le courant d'air froid a été discutée par H. J. Cox (17), d'après les observations faites dans l'Etat de Caroline. A altitudes égales, une pente voisine d'un sommet est plus chaude

qu'une pente précédée de terres de faible déclivité, qui rayonnent fortement et forment une sorte de « bassin collecteur » pour l'air froid. De même, de larges vallées dominées par des montagnes élevées sont en général plus froides que des vallées très étroites, où l'horizon élevé atténue le refroidissement par rayonnement, où, d'autre part, la brise de montagne est particulièrement forte et empêche l'accumulation d'air froid, où, enfin, le « bassin collecteur » est moins étendu.

Les mesures faites dans le massif du Grosser Arber ont également porté sur les *températures maximums*. Les résultats obtenus sont les suivants : 1° les maximums diurnes décroissent avec l'altitude ; 2° le taux de cette décroissance est indépendant de la provenance de l'air ; il est de l'ordre de 0°,6 à 0°,9 par hectomètre (ce qui est le taux de la décroissance normale de la température dans l'air libre).

D'après F. Innerebner (39), les gradients le long des pentes n'atteignent ou ne dépassent la valeur adiabatique que lorsque la situation particulière d'une station produit des températures anormales. Ainsi, le gradient hyperadiabatique [1]) trouvé par l'auteur entre Innsbruck et les stations voisines doit être attribué à l'influence de l'agglomération urbaine sur la station de base.

Alors que les maximums décroissent toujours avec l'altitude, les minimums s'élèvent rapidement jusqu'à la ceinture chaude, pour décroître ensuite de nouveau ; il en résulte que l'amplitude diurne est la plus élevée au pied de la montagne ; elle est minimum au niveau de la ceinture chaude. D'autre part, comme le taux de la décroissance du maximum est inférieur au taux de croissance du minimum entre la base de la pente et la ceinture chaude, celle-ci représente en même temps le niveau où la température moyenne diurne est la plus élevée.

Le maximum de température dépend, en chaque point, de *l'exposition* du terrain [2]) ; celle-ci joue un rôle primordial dans l'échauffement de la surface du sol, donc de la première couche d'air : les terres exposées au midi, entre Sud-Est et Sud-Ouest, s'échauffent le plus, en raison de l'incidence des rayons solaires plus voisine de la normale vers le milieu de la journée. Ainsi, K. Hummel (38) a trouvé, dans les montagnes de l'Allgäu (Bavière), sur un versant exposé au midi, que la température de la surface du sol (sable) pouvait dépasser 73°.

Les écarts de température dus à des différences d'exposition sont, bien entendu, d'autant plus sensibles que la pente du terrain est plus forte.

Il est intéressant de remarquer que l'exposition optima, c'est-à-dire celle qui donne lieu aux températures du sol les plus élevées, n'est l'exposition Sud qu'au printemps et en automne. En hiver, l'exposition Sud-Ouest est la plus favorisée ; en effet, durant la matinée, une grande partie de la chaleur que reçoit le sol sert à évaporer la rosée qui s'y est déposée pendant la nuit, elle est donc perdue au point de vue thermique ; pour un versant Sud-Ouest, le rayonnement reçu est le plus intense au cours de l'après-midi, c'est-à-dire quand le sol a déjà perdu une grande partie de son humidité ; il sert donc presque uniquement à échauffer le sol. Pendant l'été au contraire, l'exposition optima est celle au Sud-Est ou Sud-Sud-Est, en raison du taux élevé de la nébulosité pendant les après-midi d'été, notamment en pays montagneux.

Les différences de constitution du sol modifient, comme en plaine, la température de la surface du sol, donc celle de la première couche d'air. Mais il se produit ici un mouvement d'air ascendant le long des pentes ; il y a par conséquent mélange des masses d'air de températures différentes, d'où égalisation de la température. D'ailleurs, l'effet du vent, jamais entièrement calme le jour, se superpose à ce « tirage » et favorise le mélange de l'air.

La végétation a une influence opposée à celle du vent : en gênant les mouvements d'air, les arbres, buissons, etc., tendent à maintenir en chaque point le microclimat caractéristique du genre de sol ; d'ailleurs, les végétaux modifient eux-mêmes le microclimat, en s'échauffant au soleil et en chauffant à leur tour l'air ambiant. Le rôle essentiel d'une bonne exposition est précisément de favoriser l'échauffement des végétaux par l'action directe des rayons solaires ; sur une pente bien exposée, cet échauffement est plus intense que partout ailleurs, et surtout, pour une inclinaison donnée, de plus longue durée que pour toute autre exposition. La pente la plus favorable est d'ailleurs celle pour laquelle l'incidence des rayons solaires est, en moyenne, la plus voisine de la normale ; pour nos latitudes, l'optimum de pente est donc d'environ 45°.

3° Influence du climat local sur les végétaux.

Des différences de climat considérables entre points très rapprochés, telles que celles qui ont été décrites dans le chapitre précédent, se répercutent nécessairement sur le rendement des cultures pratiquées en pays

---

[1]) Le terme « hyperadiabatique », composé exclusivement de radicaux grecs, doit être préféré au terme « supraadiabatique », mi-latin, mi-grec, qu'indique le Lexique météorologique publié par l'O. N. M.

[2]) Dans sa *Flore d'Alsace* (troisième volume, Paris 1858), Fréd. Kirschleger ne se lasse pas d'insister sur l'importance de *l'exposition* : « Le Noyer qui, du côté exposé au Midi, dans nos larges vallées, s'élève jusqu'à une altitude de 650 et même 700 m., disparaît du côté opposé, à 550 m. Une ferme exposée au Midi vaut le double d'une autre exposée au Nord, toutes choses égales d'ailleurs. » (p. 11). — « ...*l'exposition* au Midi, à 500 jusqu'à 900 m., est un avantage immense, favorisant de 8 et 15 jours la maturité des récoltes. » (p. 12). — « Tout dépend encore ici de *l'exposition*, facteur très-complexe. On trouve des plantes très-différentes sur les versants exposés au Sud et au Nord, dans les basses comme dans les hautes régions. » (p. 13).

montagneux ; le relief du sol pose donc au cultivateur un double problème : rechercher les situations les plus favorables ; adapter, en chaque point, les espèces cultivées au climat local.

Les observations phénologiques montrent que la végétation est toujours la plus avancée sur la ceinture chaude ; en chaque point de la région, les différentes phases de la végétation sont d'autant plus en retard, par rapport à la ceinture chaude, que le minimum moyen y est plus bas ; d'ailleurs, plus la saison chaude approche, plus l'influence de cette ceinture s'accentue. D'autre part, en raison des températures diurnes élevées dans la vallée, de deux stations ayant la même température nocturne, celle qui est au-dessous de la ceinture chaude est avantagée par rapport à celle qui se trouve au-dessus (résultats des mesures faites dans le massif du Grosser Arber).

Je citerai aussi les observations faites par J. C. Alter (2), dans la vallée du Lac Salé (Utah, Etats-Unis). A East Mill Creek, la végétation est de 15 jours en avance par rapport à Wandamere, faubourg de Salt Lake City, situé seulement à 3 km. de distance horizontale, mais environ 65 m. plus bas, au fond de la vallée. Aussi les vignobles et vergers se trouvent-ils exclusivement sur les hauteurs, les environs de Wandamere étant réservés aux champs.

L'influence de la ceinture chaude sur le rendement des cultures est des plus sensibles dans les vignobles de la région de Barr. La végétation est toujours la plus avancée sur les pentes du Kirchberg qui dominent la ville, où la température est la plus élevée au cours de la nuit. Ce résultat n'est d'ailleurs pas dû uniquement à la répartition des minimums nocturnes ; l'exposition au midi favorise les cultures en intervenant d'une façon double : l'échauffement direct des ceps par le soleil y est plus fort qu'ailleurs, et les vignobles y sont protégés contre les vents froids soufflant du secteur Nord ; d'autre part, le sol, très riche en calcaire, s'échauffe plus que, par exemple, le sol argileux du versant Est du Kirchberg.

Un autre avantage de la situation consiste dans la possibilité de vendanger très tard (parfois fin octobre), sans avoir à craindre des dégâts par suite de gelées précoces ; les raisins poussant sur ces coteaux peuvent donc atteindre un degré de maturité exceptionnel. Il en résulte que les vins provenant du Kirchberg ont un bouquet beaucoup plus prononcé que les vins des mêmes cépages provenant de la plaine. La différence est particulièrement sensible dans les années pluvieuses, où les vins du Kirchberg ont une acidité bien inférieure à celle des autres vins. Le Gewürztraminer domine dans le Kirchberg ; sa qualité y est remarquable par suite de la situation ensoleillée et de la composition du sol. Au contraire, le versant Est de la montagne jouit d'un climat moins favorable ; toutefois, le sol argileux, en retenant mieux l'humidité, y permet la production de vins de bonne qualité dans les années sèches.

De tous les vignobles, ceux qui sont situés dans la plaine sont les plus exposés aux gelées printanières ; la récolte y est donc souvent déficitaire. J'ai parlé plus haut (page 20) de la gelée blanche du 23 avril 1933, qui a gravement endommagé le vignoble alsacien. La situation isobarique était caractéristique : vaste aire de hautes pressions recouvrant la péninsule Ibérique et la France.

La Revue *Les Vins d'Alsace* a fait, à cette occasion, une enquête auprès des viticulteurs des deux départements, dans le but de déterminer quels étaient les vignobles les plus atteints par cette gelée. Les réponses concordèrent d'une manière absolue : les dégâts avaient été partout les plus graves dans les vallées ou dans la plaine.

Dans la région de Barr, les dégâts ont également été considérables. L'effet de la gelée a été particulièrement visible dans certains vignobles du Lerchenberg (station n° 15). Jusqu'à une hauteur de 70 cm. environ au-dessus du sol, tous les bourgeons avaient péri par suite du froid, alors que la partie supérieure des ceps était indemne ; la limite entre les bourgeons endommagés et les bourgeons intacts était d'une régularité surprenante et montrait bien que l'air froid s'était étalé en mince couche sur le sol.

Les avantages d'une bonne situation et les dangers auxquels sont exposées les cultures en plaine sont connus de longue date ; il est curieux de constater que bien avant la Guerre de Trente Ans, il était défendu de planter des vignes dans la plaine d'Alsace ; cette interdiction, tombée en oubli, fut renouvelée par une ordonnance en date du 16 janvier 1731, à la suite de laquelle les vignes de la plaine furent impitoyablement arrachées. Un arrêté de 1650 défend de planter des arbres sur les meilleurs coteaux de la région de Barr ; aujourd'hui encore, ceux-ci sont presque exclusivement couverts de vignobles [1]).

Il importe de remarquer qu'en cas de gelée tardive, les coteaux, où la végétation est déjà plus avancée, peuvent souffrir davantage que les autres terres. Cependant, la gelée peut être due à deux causes différentes, et les dégâts ne se répartissent pas de la même façon dans un cas et dans l'autre.

En cas de gelée nocturne par rayonnement, les dégâts sont limités aux terres situées au pied de la montagne, les versants de la montagne sont indemnes. Les coteaux sont d'ailleurs d'autant plus à l'abri des gelées par rayonnement que celles-ci suivent en général des journées claires, au cours desquelles les pentes bien exposées ont été fortement chauffées.

Au contraire, lorsque la gelée est due à un vent froid, les dégâts sont sensiblement les mêmes partout. Les versants exposés au Sud sont cependant encore tant soit peu favorisés par rapport aux autres situations, parce qu'ils sont abrités contre le vent froid.

---

[1]) *Revue des Grands Crus et Vins de France*, décembre 1932.

La superposition des deux types de gelée, par temps clair et sec, constitue le phénomène du « *freeze* » tant redouté des cultivateurs des Etats-Unis (65) : le vent froid, soufflant de Nord ou Nord-Est, empêche l'échauffement des terres au cours de la journée ; le vent tombe le soir, de sorte que, pendant la nuit suivante, le rayonnement produit une baisse de la température de l'air, baisse d'autant plus forte que l'air, d'origine continentale, est très sec ; les dommages peuvent donc être très considérables, sur les pentes comme dans les vallées. Les températures ci-après, citées par F. D. Young (64), montrent bien la différence qu'il y a entre une gelée nocturne ordinaire et un « freeze » ; elles ont été enregistrées dans les plantations d'orangers et de citronniers, dans le Sud de la Californie (voir page 31) :

En 1918, au cours d'une gelée nocturne, on a mesuré —6° au pied d'une colline, et 9° sur la pente de cette colline, 75 m. plus haut ; la différence de température était donc de 15° ; les dégâts étaient limités aux terres situées à faible altitude.

Pendant l'hiver 1922, avant la cueillette des oranges, il s'est produit, dans cette même région, un « *freeze* » qui a détruit 47 % de la récolte. Dans les mêmes stations au pied et sur le versant de la colline, la température était respectivement de —8° et de —3° ; la différence n'était donc que de 5°, mais les températures étaient partout plus basses.

4° Protection contre les gelées nocturnes.

Les gelées printanières qui se produisent après l'éveil de la végétation peuvent gravement compromettre la récolte à venir, en détruisant les bourgeons ou les fleurs ; elles sont un des plus graves dangers qui menacent notamment les vignobles et les vergers. De même, les gelées précoces de l'automne peuvent endommager des récoltes encore sur pied. Aussi les cultivateurs s'emploient-ils, et ceci depuis fort longtemps, à combattre ce fléau. Les gelées nocturnes sont d'ailleurs presque le seul phénomène météorologique contre lequel l'homme puisse mener une lutte efficace (à condition de passer sous silence la question, tant discutée, des tirs paragrêles).

Cette possibilité tient aux faits qu'au cours de ces gelées nocturnes, la température ne s'abaisse en général que de peu de degrés au-dessous de 0° ; que les gelées sont dues au refroidissement du sol et des plantes par rayonnement, phénomène que l'on peut empêcher par des écrans appropriés ; qu'elles sont généralement localisées dans des régions bien déterminées, telles que plaines, cuvettes ou bas-fonds, ce qui permet de prendre à l'avance toutes dispositions utiles en vue de la protection à assurer ; qu'enfin, comme les basses températures ne peuvent se produire qu'en l'absence totale ou presque totale du vent, les nuages de fumées que l'on produit ne sont pas trop rapidement chassés, mais séjournent un certain temps au-dessus des terres à protéger.

Une étude complète des divers procédés qui ont été employés sortirait du cadre de cette étude ; je me bornerai à en donner une énumération, complétée par quelques renseignements sommaires. J'indiquerai plus tard les résultats obtenus à l'occasion d'expériences de protection par nuages artificiels, effectuées sous le contrôle de l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg. Un très bon aperçu sur l'ensemble de la question a été publié par M. R. Olivier (52) dans *La Météorologie* ; cette étude constitue, en quelque sorte, une synthèse des très nombreux articles, parus dans *Monthly Weather Review*, sur les modes de protection adoptés dans les différents États de l'Amérique du Nord.

La lutte contre les gelées nocturnes est, en effet, d'une pratique courante surtout aux Etats-Unis. Les cultures, en particulier celle des fruits, s'y font d'une façon intensive et avec un rendement à l'hectare très élevé, ce qui justifie la mise en œuvre de tous les moyens possibles pour la sauvegarde de la récolte ; d'autre part, les principales régions consacrées à ces cultures se trouvent au Sud du 40e parallèle Nord, donc dans un climat relativement doux, et, à part les « *freeze* », ce sont surtout les gelées nocturnes, assez fréquentes en raison de la grande sécheresse de l'air, qui peuvent compromettre une récolte.

Les principales méthodes de protection sont les suivantes :

1° *Protection contre le rayonnement par des écrans solides.* — Le verre constitue, théoriquement, le meilleur écran, étant transparent aux radiations lumineuses et opaque pour le rayonnement de grande longueur d'onde (effet de serre), mais son prix de revient en interdit l'emploi sur une grande échelle. On a employé avec succès, pour la protection de grandes étendues, des écrans de toile de jute, ou encore de mousseline, tendus au-dessus d'un verger, ainsi que des claies en bois disposées au-dessus de plantations de faible hauteur, à environ 2 m. 50 du sol ; ces modes de protection ne sont efficaces que s'ils sont appliqués à une assez grande superficie (1/2 hectare au minimum). Lorsque les plantes sont très basses, on peut poser les toiles directement sur elles. La protection des végétaux par des branchages est d'un usage courant, mais ne peut être appliquée rationnellement dans une exploitation de quelque importance.

2° *Protection par mélange de l'air.* — Un fort brassage de l'air, à l'aide de puissants ventilateurs, a pour effet de détruire ou d'atténuer l'inversion, donc d'élever la température de l'air au voisinage du sol ; ce procédé est, comme les précédents, généralement trop coûteux.

3° *Protection par inondation.* — Ce mode de protection consiste à inonder les terres lorsqu'il y a menace de gelée ; en se refroidissant et surtout en se solidifiant, l'eau dégage une grande quantité de chaleur et retarde la baisse de température ; d'autre part, la nappe d'eau favorise la formation d'une couche de brouillard, qui réduit le rayonnement effectif des plantes. La méthode n'est applicable qu'en des régions où l'eau est abondante ;

d'ailleurs, la fusion de la glace entraîne, le matin, une perte de chaleur solaire non négligeable ; enfin, l'excès d'eau rend les plantes plus délicates (60).

Le procédé qui consiste à projeter sur les plantes de l'eau liquide, ou de la vapeur d'eau, a les mêmes inconvénients ; en outre, un poids excessif de glace risque de briser les branches.

4° *Protection par échauffement de l'air.* — Ce mode de protection est le plus répandu en Amérique ; il consiste à chauffer l'air à l'aide d'un grand nombre de foyers, appelés « *heaters* », récipients en tôle ou en fonte posés à même le sol ; ceux-ci sont alimentés par des combustibles divers, solides ou liquides, et dont le choix est déterminé par leur prix de revient à l'endroit considéré et par le rendement obtenu. Les foyers agissent d'une façon double : d'une part, ils échauffent les végétaux directement par rayonnement, d'autre part, ils produisent une circulation d'air, qui amène au voisinage du sol, des masses d'air qui se trouvaient primitivement à une certaine hauteur, qui sont par conséquent plus chaudes. Pour éviter une perte de chaleur, on doit éviter que ces mouvements convectifs ne s'étendent à une trop grande hauteur au-dessus du sol ; on a été amené, pour cela, à réduire progressivement le volume, donc le pouvoir chauffant des foyers, et à en augmenter le nombre. Ainsi, dans les vergers, on installe fréquemment autant de foyers qu'il y a d'arbres .

Des expériences faites en Californie (65) ont fait ressortir des différences de plus de 4°C. entre vergers chauffés et vergers non chauffés. Des résultats intéressants ont été obtenus lors de l'expérience de protection faite en avril 1932, au verger de la Direction des Services agricoles d'Indre-et-Loire, à Saint-Symphorien-les-Tours (26). 52 foyers étaient installés sur une surface d'un demi-hectare environ. Le sol étant entièrement plat, les mesures faites dans la parcelle protégée et dans une parcelle témoin, en deux points distants de 150 m., sont rigoureusement comparables entre elles. La température de l'air a été mesurée, dans les deux stations, à des intervalles de temps réguliers et à une série de niveaux compris entre $0^m,10$ et 3 m. Il résulte de ces observations que l'échauffement est particulièrement sensible au sol : « A $0^m,10$, l'écart des températures atteignit $4^o,5$, et $2^o,7$ à $0^m,50$, tandis qu'il n'atteignit pas 2° et se maintint à une moyenne de 1° environ pour les couches d'air de 1 à 3 mètres au-dessus du sol ». Dans la parcelle chauffée, le gradient thermique était donc notablement plus faible que dans la parcelle témoin.

5° *Protection par nuages artificiels.* — Les nuages artificiels, dont le rôle est de rayonner vers le sol, sont produits généralement par la combustion de substances végétales très humides ; paille mouillée, mauvaises herbes, fumier, etc... ; le nuage est alors fortement chargé de vapeur d'eau qui, en se condensant, dégage de la chaleur (600 calories par gramme d'eau condensée) ; cette chaleur est donc transportée, à l'état latent, à partir du foyer jusqu'à quelques mètres au-dessus du sol ; une partie est restituée au sol, par rayonnement, et sert à échauffer les végétaux : la chaleur produite au foyer est ainsi répartie sur toute l'étendue des terres à protéger. Huiles, goudrons, etc., sont également employés comme combustibles, et donnent une fumée noire, abondante, riche en carbone, qui émet un fort rayonnement.

Il y a lieu de remarquer que les foyers agissent à la fois par la chaleur qu'ils rayonnent et par l'écran de fumée qu'ils produisent. D'après W. Schmidt (57), la combustion d'huiles lourdes dans un foyer de modèle courant produit, à 3 m. du foyer, un rayonnement utile de 0,1 à 0,3 cal/min/cm², et réduit en plus, grâce au nuage de fumée, le rayonnement effectif de 10 à 30 %. Des expériences de fumigations effectuées sous le contrôle de ce même auteur ont fait ressortir une différence de température de 2° entre la parcelle protégée et la parcelle témoin ; il semble cependant que le résultat soit en réalité meilleur : le terrain d'expérience était trop petit, et de l'air froid des environs a pénétré dans la parcelle protégée.

La protection des cultures par nuages artificiels est connue depuis fort longtemps ; elle aurait été déjà pratiquée par les Romains. Dans son « Traité d'Économie rurale », J. B. Boussingault rapporte avoir vu, en Amérique, les Indiens faire des feux de paille humide, pour empêcher des dégâts par gelées nocturnes.

En Alsace, un service de protection du vignoble contre les gelées avait été organisé à Colmar à la fin du dernier siècle et avait donné des résultats satisfaisants. Mais comme il se passe chez nous parfois plusieurs années consécutives sans qu'il se produise des gelées nuisibles aux vignes, cette organisation ne semble avoir fonctionné que peu de temps.

J. P. Chamberlent (15) a insisté sur l'importance qu'il y a de ne pas interrompre les fumigations de trop bonne heure le matin ; les premiers rayons du soleil doivent encore tomber sur la nappe nuageuse, un dégel trop rapide conduirait à l'évaporation de l'eau sortie des cellules végétales au moment du gel, et à leur destruction par déshydratation. L'auteur cite, comme exemple, le cas qui s'est produit à Avensan (Gironde) au printemps 1892. Des fumigations avaient été faites durant la nuit, mais avaient été arrêtées à 7 heures, de sorte qu'à 8 heures le nuage avait disparu. A ce moment précis, tous les bourgeons ont été brûlés par le soleil. En rallumant les foyers à 7 heures, on aurait évité le désastre. Au contraire, en 1890, après une forte gelée nocturne, le soleil ne parut que vers 9 h. 30, le ciel étant partiellement couvert de nuages, et la vigne ne fut pas atteinte.

Des exemples analogues montrant le danger d'un dégel trop rapide abondent ; je mentionnerai seulement l'observation faite au Jardin botanique de l'Université de Strasbourg au cours de l'hiver très rigoureux 1928-1929 : d'une file de rosiers, seuls ceux qui se trouvaient au moment du lever du soleil à l'ombre d'une clôture ont résisté.

Au lieu d'être produites par la combustion de matières organiques ou minérales, les fumées peuvent être obtenues par réaction entre substances chimiques, amenées en contact dans des appareils appropriés. Divers

modèles d'appareils ont été conçus ; certains d'entre eux, montés sur roues, sont transportables et peuvent être amenés, en plein fonctionnement, à n'importe quel point du terrain, suivant les variations de la direction du vent.

La Société Anonyme des Hauts-Fourneaux et Fonderies de Pont-à-Mousson construit de tels appareils fumigènes ; le brouillard artificiel y est produit par l'action d'un acide spécial dit «fumigène» sur de la chaux vive, l'acide en excès étant neutralisé par de l'ammoniaque.

A la demande de l'Association des Viticulteurs d'Alsace, cette Maison a organisé deux démonstrations de ses appareils fumigènes : la première, le 14 février 1934 aux environs de Barr ; la seconde, le lendemain près de Colmar. L'Association des viticulteurs avait prié, en même temps, l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg d'effectuer des mesures de température qui permettraient d'apprécier l'efficacité de la méthode. Pour accéder à ce désir, il a été préparé un matériel assez important, comprenant :

12 inscripteurs de température, qui seront décrits ultérieurement (p. 41).

18 thermomètres à minimums, munis d'écrans Budig.

2 psychromètres Assmann.

2 installations complètes pour mesures thermo-électriques, avec soudures *BC* (voir la description, p. 9). Ces deux appareils ont servi à déterminer la température des sarments ; il a paru indispensable de mesurer celle-ci en même temps que la température de l'air ; l'ampleur des dégâts causés par une gelée dépend, en effet, non pas de la température de l'air, mais de celle des organes végétaux sensibles à la gelée, et ces deux températures peuvent présenter des écarts considérables, notamment par ciel clair, c'est-à-dire dans les conditions où se produisent généralement les gelées nocturnes.

Comme les bourgeons n'étaient pas encore sortis, on a opéré sur les extrémités des sarments ; parmi ceux-ci, on a choisi les plus minces, épais de 4 à 5 mm. et comparables, par leur inertie, à des bourgeons. Le contact entre sarments et soudures était réalisé comme suit : une entaille pratiquée longitudinalement, et du côté du sarment dirigé vers le ciel, permettait d'engager la soudure sous une mince languette de bois, de bas en haut ; une ligature faite avec du fil maintenait la soudure en place. Les soudures thermo-électriques se trouvaient uniformément à $1^m,40$ au-dessus du sol ; les mesures sont donc comparables entre elles. Les trois soudures de chaque installation permettaient de déterminer, avec une approximation suffisante, la *température moyenne de l'extrémité des sarments*.

La démonstration de **Barr** a été faite au Sud-Est de la ville, au delà de la voie ferrée. Le terrain, mi-partie vigne, mi-partie prairie, était légèrement ondulé. Les mesures principales ont été faites en deux stations équipées identiquement, dont l'une (*A*) se trouvait dans la zone à protéger par la nappe nuageuse, tandis que l'autre *(B)*, en dehors de cette zone, servait de station témoin.

Les conditions atmosphériques étaient particulièrement favorables ; pendant toute la durée de l'expérience, le ciel est resté absolument clair, et le vent est demeuré trop faible pour actionner un anémomètre de poche Robinson, c'est-à-dire inférieur à 0,5 m/sec.

Par contre, le choix des stations avait été moins heureux : l'expérience a montré qu'il existait entre elles des différences de microclimat très sensibles, qui se superposèrent aux différences qui devaient être constatées. Les deux stations *A* et *B* étaient à une distance de moins de 300 m. l'une de l'autre, et presque au même niveau (*B* de 4 m. plus haut que *A*) ; mais en *B*, le terrain était absolument plat, alors qu'en *A*, il s'abaissait très doucement vers une prairie affectant, avec les vignes environnantes, la forme d'une cuvette. Il y avait, par conséquent, au-dessus de cette prairie et des vignobles en bordure, accumulation d'air froid qui ne pouvait pas s'écouler, et que le rayonnement de la prairie refroidissait encore. Durant toute l'expérience, *A* est donc resté plus froid que *B*, alors que l'on était en droit de s'attendre à l'inverse. Dans ces conditions, seules les *variations* de température peuvent servir à déterminer l'effet du brouillard ; il est, en effet, loisible d'admettre que celles-ci eussent été partout sensiblement les mêmes si la nappe de brouillard n'eût produit aucun effet.

Pour la même raison, les indications des inscripteurs et des thermomètres à minima qui avaient été répartis sur le terrain étaient difficiles à utiliser et n'ont pas été retenues.

Dans la fig. 26 sont reproduites les courbes représentant la marche de la température de l'air en *A* et en *B*, à $1^m,50$ au-dessus du sol ; les lignes brisées représentent la température moyenne des trois sarments dans les deux stations (station *A* : trait continu, station *B* : trait interrompu).

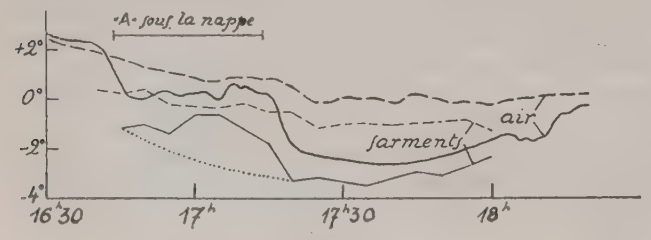

Fig. 26.

On voit avant tout qu'en chaque station, la température des sarments fut toujours inférieure à celle de l'air au même niveau ; ce fut donc bien l'abaissement de température des végétaux et du sol, par rayonnement, qui fut la cause du refroidissement de l'air. Dans le cas contraire, c'est-à-dire dans le cas où l'abaissement de température des sarments aurait été produite par un vent froid, la méthode de protection par nuages artificiels eût été inopérante.

La station *A* a été sous la nappe de 16 h. 44 à 17 h. 14. Durant tout cet intervalle, la température de l'air et celle des sarments s'est maintenue presque aussi élevée en *A* qu'en *B*. La courbe pointillée montre

la marche qu'aurait eue approximativement la température des sarments en *A*, en l'absence de la nappe de brouillard ; elle fait ressortir, à 17 h. 05, un gain de température de l'ordre de 2°.

Au contraire, dès la disparition de la nappe, c'est-à-dire entre 17 h. 15 et 17 h. 20, les températures de l'air et des sarments baissent rapidement en *A*.

Dans la fig. 27 sont portées en ordonnées les différences entre les températures des sarments en *A* et des sarments en *B*. Les variations de largeur de la plage hachurée montrent l'effet de la fumigation. Malgré le microclimat beaucoup moins favorable en *A*, la température des sarments y est presque aussi élevée qu'en *B*, tant que *A* est sous la nappe (17 h. 05 : différence de température = —0°,27) ; au contraire, dès que le brouillard artificiel s'est retiré, *A* redevient notablement plus froid (17 h. 20 : différence de température = —2°,88). Entre ces deux valeurs extrêmes, l'écart est de 2°,6 ; on peut évaluer à 1°,5 ou 2° en moyenne, l'élévation de la température des sarments produite par la nappe de brouillard.

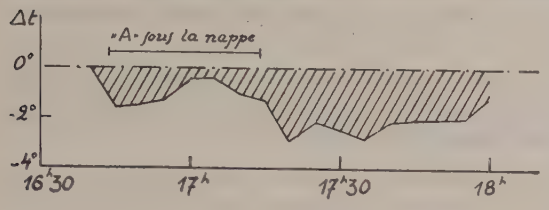

Fig. 27.

Ce résultat doit être considéré comme satisfaisant. Il montre bien l'efficacité des fumigations, mais aussi les limites de cette efficacité.

D'autres appareils, basés sur le même principe, ont d'ailleurs permis d'obtenir une élévation de température plus forte, de 3°,4 en moyenne, sous la nappe nuageuse (8). Cependant, il ne faut pas oublier que les différentes expériences n'ont été faites, ni sur des terrains de configuration identique, ni dans les mêmes conditions atmosphériques. Les résultats numériques obtenus peuvent donc différer, sans qu'il soit permis de conclure à une efficacité plus ou moins grande de la méthode employée dans chaque cas.

On remarquera, sur la fig. 26, la hausse de température en *A*, qui débute vers 17 h. 45 ; elle est due à l'apparition d'un très léger brouillard naturel au-dessus de cette station, brouillard à peine perceptible, mais pourtant suffisant pour relever assez sensiblement la température.

Des mesures analogues à celles qui viennent d'être décrites ont été effectuées le lendemain dans les vignobles du Canton de la Hardt, au Nord-Ouest de **Colmar**.

Les conditions étaient nettement différentes : Le terrain, absolument plat, ne donnait pas lieu à des différences de microclimat, et les mesures faites en des points différents du terrain étaient ainsi parfaitement comparables entre elles. Par contre, le ciel était très nuageux ou couvert (nébulosité 8 à 10), et le vent, modéré ou assez fort. On était donc loin des conditions dans lesquelles se produisent les gelées de printemps.

Les mesures thermo-électriques ont de nouveau été faites simultanément dans deux stations : « *A* » sous nappe et « *B* » hors nappe. La fig. 28 représente, à échelle double, les mêmes éléments que la fig. 26 ; cependant, c'est cette fois-ci la température des sarments qui est figurée par les deux courbes quasi-continues, et la température de l'air qui est représentée par les deux lignes brisées ; en effet, comme l'expérience de la veille nous avait conduits à attacher plus d'importance à la température des sarments qu'à celle de l'air, la première a été mesurée toutes les minutes, et la dernière, seulement de 5 en 5 minutes.

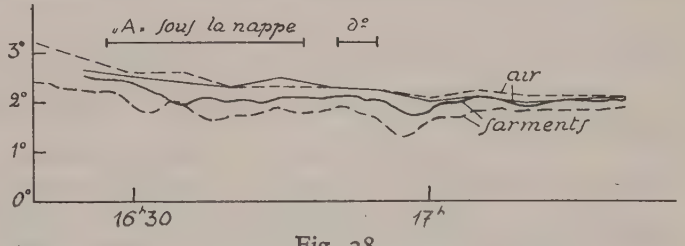

Fig. 28.

On voit sur ce graphique que, malgré les conditions défavorables, l'effet du brouillard sur la température des sarments n'est pas négligeable ; pour celle-ci, en effet, la différence entre *A* et *B*, très faible auparavant et après, atteint 0°,6 pendant la fumigation. Pour la température de l'air, au contraire, les deux stations ne diffèrent presque pas l'une de l'autre ; la température de l'air portée sur le graphique a été mesurée, à l'aide du psychromètre Assmann, à 1m,60 du sol. A cette hauteur, l'air était trop fortement brassé par le vent pour que sa température fût nettement influencée par le nuage. Il n'en était pas de même au voisinage immédiat du sol, où les mouvements de l'air sont réduits à peu de chose, par suite du frottement : sur les thermomètres installés à 10 cm. du sol, la présence de la nappe s'est manifestée par une hausse de 0°,3 en moyenne.

Il n'a pas été possible d'effectuer des mesures de contrôle, analogues à celles faites à Barr et à Colmar, dans un cas de menace effective de gelée blanche. Cependant, les résultats obtenus par des cultivateurs faisant usage d'appareils fumigènes sont entièrement en faveur de cette méthode de protection.

A la question purement scientifique se superpose, bien entendu, la question financière. En effet, le cultivateur qui prend des mesures de protection contre les gelées blanches, par quelque méthode que ce soit, a de lourdes charges à supporter : amortissement du matériel, approvisionnement en combustible, main-d'œuvre ; de trop nombreuses « sorties », nécessaires ou résultant d'une mauvaise prévision du minimum nocturne, risquent de compromettre le bénéfice escompté.

La discussion de cette question, comme l'étude de l'organisation matérielle des luttes contre les gelées, n'ont pas leur place dans le présent travail.

La pratique rationnelle et économique des méthodes de protection décrites ci-dessus est basée, avant tout, sur une **prévision** exacte **du minimum nocturne.** Cette prévision est bien du ressort de la micrométéorologie, car, comme je l'ai montré plus haut, en terrain accidenté le minimum est excessivement variable d'un point à l'autre ; la prévision générale du temps basée sur la situation isobarique, etc., doit donc être corrigée d'après des données strictement locales.

Voici, avec les indications bibliographiques correspondantes, l'énumération des principales méthodes dont il est fait mention dans la littérature météorologique. Dans les formules, j'ai presque partout conservé les notations adoptées dans les mémoires originaux.

1° *Méthode du point de rosée*, dite aussi 1re *méthode de Kammermann* (41) : Le minimum nocturne diffère peu du point de rosée, tel qu'il est déterminé au début de la nuit. Une faible correction, différente pour chaque mois de l'année, permet de passer de l'une de ces températures à l'autre.

2° 2e *méthode de Kammermann* (41) : La différence entre le minimum nocturne et la température lue sur le thermomètre mouillé à une heure donnée (13 h., p. ex.) est sensiblement constante pour chaque mois.

3° Une autre méthode, indiquée par le même auteur (41), est basée sur le fait que la différence entre la température à 22 h. et le minimum suivant est proportionnelle à la différence entre le maximum précédent et la température à 22 h. La relation est, à vrai dire, assez lâche ; d'autre part, cette méthode ne tient pas compte de l'humidité de l'air ; elle ne paraît jamais avoir été appliquée, et je ne la cite que pour mémoire.

4° La *formule d'Ångström* (4) donne le minimum nocturne en fonction de t_0, température du thermomètre sec, et de t_1, température du thermomètre mouillé :

$$t_{min} = C_1 t_1 - C_0 t_0 - k ;$$

(C_0 et C_1 : constantes à déterminer pour chaque station ; k : correction variable, fonction de la saison et de la nébulosité). Cette méthode est basée sur l'étude théorique de l'abaissement de la température de l'air, au cours de la nuit.

5° Les *formules hygrométriques* dérivent de la 1re méthode de Kammermann : au lieu d'appliquer au point de rosée une correction fixe, celle-ci est fonction de l'humidité de l'air.

a) *formule linéaire de Smith-Donnel* (59) :

$$t_{min} = D - a + bf ;$$

(D : point de rosée ; f : humidité relative ; a et b : constantes).

b) *formule parabolique de Smith-Donnel* (51) :

$$t_{min} = D - a + bf + cf^2 ;$$

c) *méthode des corrections arbitraires, de Donnel-Young* (50) :

$$t_{min} = D - \frac{f - 20}{4} + V(D) + V(f) ;$$

$V(D)$ et $V(f)$ sont des variables, fonctions respectivement du point de rosée et de l'humidité relative.

6° Les *formules thermiques de Nichols* (49). Deux formules ont été successivement employées par cet auteur :

a) $t_{min} = 5/8\ t_{max} + V$ (températures en degrés Fahrenheit),

où V est une variable qui dépend des conditions atmosphériques au cours de la nuit.

b) Au lieu de faire intervenir la nébulosité, le vent, etc., sous forme d'une correction variable V, la 2e *méthode de Nichols* consiste à ranger chaque nuit dans l'une de cinq classes, qui représentent les types essentiels du temps ; pour chacune de ces classes, le minimum est donné par une formule purement linéaire, en fonction du maximum précédent :

$$t_{min} = a\ t_{max} + b.$$

La différence entre les deux *méthodes de Nichols* est un exemple caractéristique de l'évolution qu'a subie la prévision du minimum nocturne en Amérique : simplification des formules, avec classification par types de temps. Dans les régions où ces formules sont généralement employées, l'humidité relative de l'air peut atteindre des valeurs très faibles, et le refroidissement par rayonnement est, dans ce cas, très intense. L'état hygrométrique de l'air exerce donc une influence prépondérante sur le minimum nocturne, dont on ne tient pas suffisamment compte en ne faisant intervenir l'humidité que comme terme correctif.

7° La *méthode des températures actuelles*, également due à Nichols (50), est un autre exemple de cette évolution. Pour une valeur donnée du point de rosée, les formules hygrométriques se réduisent à des expressions de la forme :

$$t_{min} = \varphi(t),$$

où t est la température de l'air, par exemple, au moment de l'observation du soir.

La prévision du minimum se fait à l'aide d'une série de courbes représentant la relation ci-dessus, et tracées chacune pour une valeur donnée du point de rosée.

8° La *méthode de l'amplitude moyenne* (58) permet de calculer le minimum nocturne en retranchant du maximum diurne l'amplitude moyenne de la température, déterminée pour chaque saison et pour chaque type de temps.

9° La *méthode de l'heure de la température médiane* (58) consiste dans l'observation de la température de l'air à une heure donnée, variable au cours de l'année ; cette heure est celle où, en moyenne, la température est égale à la demi-somme du maximum précédent et du minimum suivant ; l'observation montre qu'elle est très peu variable pour un mois donné. On obtient, par conséquent, une valeur approchée du minimum de la nuit en lisant la température de l'air à cet instant, et en retranchant de cette température sa différence avec la maximum précédent.

10° Enfin la *méthode de L. Chaptal* (16), assez récente, est basée sur la lecture, faite à heure fixe, de trois thermomètres, placés, l'un sous l'abri, l'autre à la même hauteur que le premier, mais sans aucune protection, le dernier à quelques centimètres au-dessous de la surface du sol. La comparaison de ces trois instruments donne des indications sur la température et la transparence de l'air, ainsi que sur la quantité de chaleur emmagasinée dans le sol. La méthode, dont l'auteur ne décrit pas le détail, semble lui donner de bons résultats.

Les différentes méthodes que je viens d'énumérer ne peuvent donner de résultats satisfaisants qu'en cas de refroidissement purement statique de l'air, c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas, au cours de la nuit, apport de masses d'air d'origine étrangère, donc de température différente. La prévision locale du minimum nocturne ne peut donc être bonne que si elle s'appuie sur une prévision de l'évolution générale du temps.

RÉSUMÉ.

J'ai étudié, au cours de l'été 1933, la *répartition des températures minimums nocturnes* au voisinage du sol, aux environs de la ville de Barr (Bas-Rhin), située au pied des Vosges. Ces mesures montrent l'existence de la « *ceinture d'optimum de température* » ou « *ceinture chaude* », *située à mi-hauteur du Kirchberg, à l'intérieur de laquelle la température s'abaisse moins que partout ailleurs, au cours de la nuit.* L'influence qu'exerce la *ceinture chaude* sur le climat local est nettement mise en évidence par les *observations phénologiques.*

Des mesures de contrôle ont été effectuées à l'occasion de démonstrations *d'appareils fumigènes destiné à la protection des cultures contre les gelées blanches.* Ces mesures ont montré que *la température des sarments peut s'élever de 1°,5 à 2°, par suite de la présence du brouillard artificiel,* résultat satisfaisant.

TROISIÈME PARTIE.

ÉTUDE DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR EN FORÊT.

1° Énumération des études antérieures.

L'étude de l'influence qu'exerce une forêt sur le climat a déjà suscité de nombreux et importants travaux ; elle a donné lieu, notamment, il y a un demi-siècle environ, à la création des « Stations de Météorologie forestière », où la température et l'humidité de l'air étaient mesurées, à la fois, en forêt et dans une station témoin hors forêt.

En Alsace-Lorraine, trois stations forestières ont fonctionné pendant de nombreuses années : 1° dans la forêt de Haguenau, 2° à Neumatt près de Lemberg, 3° à la « Métairie », maison forestière située sur le massif du Champ-du-Feu.

Les résultats obtenus dans ces réseaux ne doivent être acceptés que sous réserve : on a eu tendance à éloigner les stations, de part et d'autre, de la lisière de la forêt, pour saisir d'une façon plus parfaite le climat en forêt et hors forêt ; mais dans ces conditions, les climats *locaux* des deux stations peuvent différer au point que la comparaison entre les mesures qui y sont faites n'aura plus aucune signification. Inversement, comme le montre R. Geiger (28), un écart faible entre les mesures en forêt et hors forêt peut signifier, soit que l'influence de la forêt est faible, soit, au contraire, qu'elle est considérable, mais s'étend jusqu'à la station témoin. L'évaluation précise de l'influence de la forêt est donc chose délicate.

On obtient cependant des renseignements utiles si l'on se contente d'étudier l'ordre de grandeur des écarts dus à la forêt. En ce qui concerne la température de l'air, *telle qu'elle est obtenue sous l'abri thermométrique à hauteur normale au-dessus du sol*, les résultats sont, sommairement, les suivants :

La température moyenne annuelle est plus basse en forêt que hors forêt. Cette différence est due surtout au fait que, dans la variation diurne, le maximum est toujours franchement plus bas en forêt qu'en dehors. Pour le minimum, au contraire, la différence moyenne entre les valeurs observées en forêt et dans les stations témoins est beaucoup plus faible et, suivant les conditions locales, tantôt positive (minimum en moyenne plus élevé en forêt qu'en dehors), tantôt négative. Le premier cas (différence positive) s'est trouvé réalisé dans les trois stations forestières d'Alsace-Lorraine [Ch. Grad (35)] ; ce fut également une différence positive qui résulta des inscriptions de température obtenues par A. Müttrich (48) à Eberswalde. Le deuxième cas s'est présenté dans la série d'observations organisées par l'Ecole forestière de Nancy et discutées par E. Cuif (18) ; ici, et cela dans trois stations placées sous des peuplements différents, la différence entre le minimum en forêt et le minimum hors forêt se révélait négative, si l'on prenait la moyenne d'une année ; dans les moyennes mensuelles, cependant, cette différence était souvent positive, et ne fut jamais très élevée.

D'après ce qui précède, des moyennes dérivées des moyennes diurnes, telles que les températures moyennes mensuelles, sont toujours plus basses en forêt qu'en dehors ; mais on constate, en plus, que la différence est plus forte pour les mois d'été que pour les mois d'hiver. Les forêts exercent ainsi, sur la température de l'air, une action à la fois refroidissante et modératrice. C'est là d'ailleurs une confirmation de la règle générale énoncée par R. Geiger (32), selon laquelle un microclimat indépendant est toujours plus extrême qu'un microclimat dépendant ; le climat de la forêt se range dans la deuxième catégorie, car il dépend essentiellement de la valeur des éléments météorologiques au niveau des couronnes, qui jouent le rôle de *sol effectif principal*.

Les lois de la répartition verticale de la température en forêt, au-dessous, au milieu et au-dessus des couronnes des arbres, paraissent avoir été étudiées pour la première fois vers 1885, par F. Eckert et J. v. Lorenz-Liburnau (22), en Autriche. Ces mesures ont été reprises plus récemment, avec une installation plus complète

et plus moderne, par R. GEIGER, d'abord près de Wondreb dans le Haut-Palatinat (28), ensuite, en collaboration avec H. AMANN, près de Schweinfurth (33). J'ai effectué moi-même des mesures de cette nature, dans le but d'étudier le rôle que jouent les couronnes dans la répartition verticale de la température en forêt.

2° DESCRIPTION DES TRAVAUX EFFECTUÉS.

Cette étude, dont les résultats seront développés ci-dessous, a été faite dans la Forêt de Haguenau, entièrement située en plaine, un des plus grands massifs forestiers de France[1]). La station était installée à proximité de la maison forestière du « *Gros Chêne* », au centre de la forêt (avril à juin 1934)[2]).

Pour des raisons de commodité, il était bon de choisir un peuplement pas très élevé ; il y avait intérêt, d'autre part, à le choisir parmi les feuillus, afin de pouvoir comparer l'influence des couronnes avant et après la feuillaison. Mon choix s'est arrêté sur un peuplement assez dense de chênes de 30 à 35 ans, d'une hauteur d'environ 9 à 10 m. Au milieu de ces chênes, une échelle de 13 m. a été dressée ; elle était soutenue par 4 perches et faisait un angle d'environ 20° avec la verticale ; son sommet se trouvait donc à près de 12 m. au-dessus du sol, soit 2 à 3 m. au-dessus des couronnes. Six abris thermométriques ont été fixés contre l'échelle, aux niveaux suivants : $0^m,40$ (abri ajouté au cours des mesures) ; $1^m,45$; $4^m,45$, à la base des couronnes ; $6^m,40$, approximativement au milieu des couronnes ; $9^m,20$, au sommet des couronnes ; $11^m,90$, dans l'air libre, à l'extrémité de l'échelle (fig. 29)[3]). Bien entendu, le niveau de la base ou des sommets des couronnes ne peut être défini avec une très grande précision ; ainsi, de nombreuses branches dépassaient le niveau de $9^m,20$, et les mesures ont montré leur influence sur la température de l'air ; néanmoins, les résultats obtenus justifient le choix de ce niveau.

Fig. 29

Les abris que j'ai utilisés étaient construits en bois, et peints en blanc ; leur base était de 30 × 13 cm., leur hauteur d'environ 20 cm. ; la toiture était en légère pente vers le Sud. Trois côtés étaient fermés par des jalousies ; l'un des grands côtés, qui se trouvait contre l'échelle, et qui était orienté vers le Nord, restait ouvert ; l'échelle était donc inclinée vers le Sud.

Les inscriptions ont été effectuées à l'aide d'instruments destinés aux sondages aérologiques et inscrivant sur noir de fumée. Ces instruments ont été très obligeamment mis à la disposition de l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg, en vue de ces recherches, par M. le Directeur de l'Office National Météorologique, à qui j'adresse mes plus sincères remerciements.

Les cylindres de ces inscripteurs font un tour en 5 heures et s'arrêtent, grâce à un système de blocage, après 5 tours. On peut donc enregistrer sur une même feuille les éléments d'une journée entière. Il est très rare que les courbes chevauchent trop pour qu'il soit possible de les dépouiller. Le développement des cylindres est d'environ $41^{mm},5$ par heure, la sensibilité des thermomètres d'environ 1 mm. par °C. ; la précision des lectures est par conséquent d'au moins $0°,2$.

Avant de mettre les inscripteurs en place, je les faisais fonctionner un certain temps en chambre, en les ventilant fortement. Lorsqu'ils étaient bien en équilibre thermique avec l'air ambiant, je faisais sur chaque courbe trois coches à quelques minutes d'intervalle, en lisant chaque fois un psychromètre Assmann placé à côté des inscripteurs. L'opération était répétée lorsque les instruments avaient été retirés des abris, précaution utile pour le cas où l'un des styles se serait déplacé au cours des manipulations. Ce double contrôle permettait de déterminer la correction à appliquer à toutes les ordonnées lues sur la courbe, avant de les convertir en degrés à l'aide des courbes d'étalonnage déterminées préalablement.

Le dépouillement des diagrammes était effectué de la manière suivante :

A l'aide de repères faits au moment de la mise en place et du retrait de l'appareil, je calculais le développement exact du cylindre. Je pointais ensuite sur le diagramme les heures entières, ainsi que les instants corres-

---

[1]) Parmi les forêts de plaine, elle n'est dépassée que par la Forêt des Landes et la Forêt de Fontainebleau.

[2]) M. LINGUINOU, Inspecteur de la Forêt de Haguenau, m'a obligeamment autorisé à installer la station dans cette forêt ; je tiens à lui en exprimer ici mes bien vifs remerciements. Je le remercie aussi, ainsi que M. CONTANT, Garde général, de l'intérêt qu'ils ont pris à mes recherches, et des suggestions qu'ils m'ont données au cours de ces travaux.

[3]) Dans cette figure comme dans les suivantes, la double flèche indique schématiquement la couche occupée par les couronnes des arbres.

pondant à 5 min. avant et 5 min. après l'heure. La température correspondant à la moyenne de ces trois ordonnées était considérée comme la température à l'heure juste. Dans certains cas particulièrement intéressants, j'ai fait sur les courbes, des lectures plus serrées, par exemple, toutes les trois minutes (fig. 40 et 41).

Les vitesses du vent étaient mesurées à l'aide d'un anémomètre de Robinson placé au sommet de l'échelle, soit à 12 m. du sol.

En comparant les inscriptions à des lectures faites au thermomètre fronde (6 avril), j'avais trouvé que les enregistreurs marquaient trop haut de 2° et même davantage. J'ai placé alors sur chacun des abris une toiture en chaume, à 3 ou 4 cm. de distance du toit en bois. Cette toiture en chaume débordait l'abri vers l'Est et vers l'Ouest de 25 à 30 cm., vers le Sud d'environ 10 cm. Ainsi, non seulement le toit en bois, mais aussi les parois latérales étaient à l'ombre, ces dernières tout au moins pendant les heures où l'insolation est la plus forte.

J'ai effectué de nombreuses mesures pour vérifier l'efficacité de ces toits de chaume. J'ai d'abord suspendu un psychromètre Assmann au même niveau que l'abri ; plusieurs lectures étaient faites au psychromètre à 1 ou 2 min. d'intervalle ; à chaque lecture, une coche était faite sur la courbe de l'inscripteur.

Cette méthode n'a pas donné de bons résultats : les écarts entre la température du psychromètre et celle inscrite sous l'abri ne suivaient aucune loi simple et semblaient dispersées au hasard. Ceci pouvait tenir à deux causes : 1° les deux thermomètres que l'on compare entre eux (inscripteur et thermomètre aspiré) ont des masses calorifiques, par conséquent des inerties, différentes ; comme la température de l'air oscille continuellement, les indications des deux instruments peuvent différer notablement ; 2° la présence de l'observateur a sur les indications des instruments une influence qui n'est pas négligeable : les inscriptions accusent une hausse de température chaque fois qu'on s'approche de l'abri.

J'ai donc abandonné cette première méthode et j'ai cherché à déterminer par voie thermo-électrique, les erreurs provenant des abris. J'ai utilisé pour cela le couple *D*. L'une des soudures était introduite dans l'enregistreur sous abri, et maintenue à 1 ou 2 cm. de son organe sensible (lame bimétallique) ; l'autre soudure se trouvait à la place de l'un des thermomètres d'un psychromètre Assmann ; celui-ci était suspendu à côté de l'abri, l'ajutage sensiblement au niveau de la lame bimétallique.

Pour chaque abri, deux séries de mesures ont été faites, l'une le jour (8 juin, 10 h. 30 à 11 h. 20), par temps clair (nébulosité 2 par Cu de beau temps, ne cachant pas le soleil) et vent moyen de 1,3 m/s. ; l'autre, la nuit (29 mai, 20 h. 50 à 22 h. 30), par vent moyen de 1,1 m/s. Le ciel était d'abord à 1/10 couvert par A-St à l'horizon, puis s'est à moitié couvert par de légers Ci. A ce moment, les mesures aux abris supérieurs étaient terminées ; pour les abris qui se trouvaient sous la couverture des arbres, cette légère nébulosité ne pouvait pas avoir d'influence.

Chaque valeur de l'écart portée dans le tableau ci-dessous est la moyenne d'un certain nombre de lectures ; ainsi, pour le jour, 30 lectures ont été faites à des intervalles de 10 sec. Les écarts sont comptés positivement quand l'abri est plus chaud que l'air, et négativement dans le cas contraire.

Abri à :		11m,90	9m,20	6m,40	4m,45	1m,45	0m,40
Ecarts :	*jour*	+ 0°,4	+ 0°,5	+ 0°,4	+ 0°,2	+ 0°,1	+ 0°,1
	nuit	— 0°,3	— 0°,2	— 0°,2	+ 0°,1	+ 0°,1	+ 0°,1

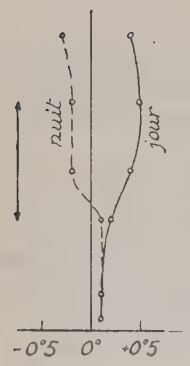

Fig. 30

La fig. 30 représente ces écarts en fonction de la position de l'abri au-dessus du sol. Les points se placent sans difficulté sur une courbe continue.

On voit que le jour, l'écart est le plus fort à 9m,20, à la hauteur des cimes : les abris au-dessous de ce niveau, protégés par les feuilles, sont partiellement soustraits à l'échauffement direct par les rayons du soleil, et l'abri à l'extrémité de l'échelle est mieux ventilé que celui au haut des couronnes. La nuit, ce sont encore les abris au-dessus des couronnes qui présentent les plus forts écarts, mais négatifs : ils ne sont pas protégés par les couronnes des arbres, et rayonnent librement ; malgré le double toit, l'instrument se refroidit au-dessous de la température de l'air.

Lorsque le soleil est voisin de l'horizon, les parois latérales des abris ne sont pas entièrement protégées contre les rayons solaires par les toits de chaume, comme elles le sont au milieu de la journée. On pouvait penser qu'il en résulterait un échauffement exagéré de l'abri et de l'inscripteur. Cette crainte s'est montrée sans fondement : à 17 h. 50 (8 juin, nébulosité 3, vent 1,4 m/s.), j'ai trouvé pour l'abri à 11m,90, par rapport à la température vraie de l'air, un écart de + 0°,2 seulement, contre + 0°,4 au milieu de la journée.

Il résulte de ce qui précède que les températures inscrites sous les couronnes peuvent être de 0°,2 trop élevées, le jour comme la nuit ; pour celles qui sont inscrites dans et au-dessus des couronnes, l'erreur peut atteindre + 0°,5 le jour, et — 0°,3 la nuit. Or, j'ai choisi à dessein, pour faire ces mesures de contrôle, des journées présentant les conditions les plus défavorables à l'inscription de la température vraie de l'air ; les nombres ci-dessus doivent donc être considérés comme des erreurs maximums, très rarement atteints. Les températures inscrites sous abri sont donc très voisines de la température vraie de l'air ; dans certains cas exceptionnels, il faudra cependant tenir compte de ces erreurs, à cause de la différence qui existe entre les abris au-dessous et ceux au-dessus de la base des couronnes.

3° Étude des résultats obtenus.

Comme en terrain dégagé, la répartition verticale de la température de l'air en forêt est nettement différente le jour et la nuit ; mais, alors que le profil thermique est en général de forme relativement simple au-dessus d'un sol découvert, ce profil est plus compliqué en forêt, où les éléments qui émettent ou absorbent le rayonnement sont répartis sur toute la hauteur du peuplement. Il est évident que la densité des branches et feuillages doit jouer un rôle essentiel : plus les couronnes sont jointives, et les feuilles grandes et nombreuses, plus la masse d'air comprise sous les couronnes est isolée de l'air libre et en diffère par ses propriétés physiques. Une exception à cette règle sera signalée plus loin (pp. 48 et 49).

Le jour, une partie du rayonnement solaire ou du rayonnement diffus est absorbée par les couronnes, qui à leur tour chauffent l'air ambiant ; il se produit, par conséquent, un maximum de température dans les couronnes.

L'écart de température entre les feuilles exposées au soleil et l'air ambiant peut être considérable. Des mesures faites le 8 juin, vers 14 h. (vent moyen 1,3 m/s), ont donné les écarts suivants : Feuille placée au haut des couronnes, + 5°,5 à + 6°,3 ; feuille au même niveau, mais plus foncée que la précédente, + 7°,8 à + 9°,2 ; feuille placée à la base des couronnes, donc à l'abri du vent, + 7°,5 à + 12°,7.

Le niveau exact auquel se produit le maximum de température accuse une oscillation très régulière au courant de la journée. Au moment de son apparition, le matin, il est localisé à la hauteur des cimes des arbres ; il s'abaisse progressivement jusqu'au niveau moyen des couronnes (vers 13 ou 14 h.) et remonte ensuite jusqu'au niveau des cimes, où il disparaît. Ce fait trouve son explication dans l'incidence plus ou moins oblique des rayons solaires.

Si les couronnes forment un écran à peu près continu, les rayons du soleil pénètrent en faible proportion à l'intérieur de la forêt ; la couche d'air sous les couronnes ne s'échauffe pas beaucoup, et guère que dans sa partie supérieure, où les courants convectifs sont les plus forts. Il en résulte que, dans le cas de couronnes très jointives, les températures en forêt se répartissent dans le sens de la plus grande stabilité : il y a *inversion entre le sol et les couronnes*. Au-dessus des couronnes, on rencontre le gradient inverse : décroissance de la température avec la hauteur. Les couronnes jouent, en effet, le rôle de *sol effectif*, point de départ pour l'échauffement de l'air.

L'inversion sous forêt, toutefois, ne peut atteindre de fortes valeurs pour les deux raisons suivantes : 1° il y a toujours une fraction du rayonnement solaire, si faible soit-elle, qui traverse les couronnes et vient frapper les troncs et surtout le sol ; à leur contact, la couche d'air sous les couronnes s'échauffe par le bas ou par le milieu, ce qui diminue l'amplitude de l'inversion ; lorsque le rayonnement reçu par la surface du sol est assez élevé, ce dernier constitue un *sol effectif secondaire* ; il donne lieu à une décroissance de température à partir du sol, laquelle se continue par une inversion juste au-dessous des couronnes ; 2° le vent n'est jamais absolument calme pendant le jour, même sous bois ; le brassage de l'air atténue donc les différences de température des différentes couches d'air.

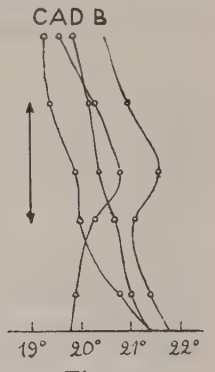

Fig. 31

Comme exemple caractéristique, je citerai d'abord la journée du 24 mai (feuilles entièrement développées, nébulosité 4, vent 1,6 m/s), où l'inversion entre le sol et les couronnes a subsisté toute la journée, avec maximum de température au niveau moyen des couronnes (12 h. 30 : fig. 31, A).

A cette journée, on peut opposer celle du lendemain, 25 mai, au courant de laquelle le ciel est resté clair, avec un vent de 2,0 m/s en moyenne. Le rayonnement solaire, plus continu et plus intense que la veille, a pénétré davantage à l'intérieur de la forêt, notamment au milieu de la journée, et a chauffé l'air à partir du sol ; la température présentait par conséquent un 2e maximum au sol, sans doute supérieur à celui dans les couronnes (13 h. 30 : fig. 31, B). Ce type de courbe ne s'est produit toutefois, ce jour, qu'à 13 h. 30 et 14 h. 30 ; avant et après, il y avait inversion sous les couronnes (type A).

Lorsque les arbres sont dépourvus de feuilles, le maximum au sol doit nécessairement gagner en importance ; il l'emporte généralement sur le maximum dans les couronnes, qui se réduit à une isothermie dans le bas des couronnes (fig. 31, C) ou disparaît même entièrement (fig. 31, D) (11 avril, 14 h. 30 et 15 h. 30 ; nébulosité 4, vent 1,6 m/s).

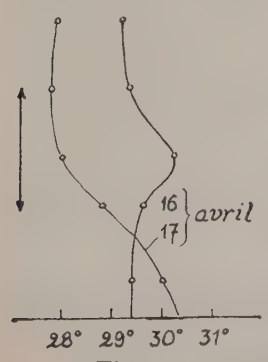

Fig. 32.

Il est intéressant de comparer entre elles les deux journées des 16 et 17 avril, exceptionnellement chaudes pour la saison. A ce moment, la plupart des chênes portaient déjà des bourgeons, dont certains s'ouvraient, marquant ainsi le début de la feuillaison.

Les conditions météorologiques étaient très semblables, ces deux jours : nébulosité 6 à 8, par Ci le 16, Ci et A-Cu le 17, vent entre 1,0 et 1,6 m/s, et maximum de température hors forêt de l'ordre de 30°. Cependant, la répartition verticale de la température vers le milieu de la journée a été tout autre le 17 que le 16 (fig. 32 : 13 h.). Le maximum de température au voisinage du sol, le 17, doit être attribué au fait que le sol avait été fortement chauffé la veille ; l'écoulement de chaleur vers l'intérieur du sol était, de ce fait, notablement diminué le 17, de sorte que sa surface atteignit, ce jour, une température relativement élevée. Au contraire, le 16, l'inversion a subsisté toute la journée sous les couronnes, ce qui indique que le sol était plus froid que l'air.

Au courant de l'après-midi et vers le soir, il y a transition progressive du type diurne au type nocturne. Les rayons solaires devenus plus obliques chauffent encore les cimes des arbres, mais n'arrivent plus à pénétrer à l'intérieur de la forêt; les feuilles et branches au voisinage du sol se refroidissent et déterminent un abaissement de la température de l'air à ce niveau.

Le refroidissement des végétaux sous bois paraît tenir à deux causes essentielles : 1° bien qu'étant abritées par les couronnes, les feuilles et branches rayonnent de la chaleur vers le ciel à travers les interstices du feuillage[1]); 2° les feuilles se refroidissent, en outre, par suite du phénomène de la transpiration, et de l'évaporation qui en résulte. L'exemple suivant montre la part qui revient à chacun de ces deux facteurs (mesures faites le 8 juin, entre 15 h. et 16 h.) J'ai comparé, à l'aide du couple *D*, la température d'une feuille de chêne, sous bois, à celle de l'air ambiant; j'ai trouvé que la différence feuille — air prouvait atteindre — 0°,6 et même — 0°,8. J'ai alors détaché la feuille de la branche qui la portait, et l'ai suspendue dans l'un des abris, de manière à l'empêcher de se refroidir par rayonnement, sans gêner sa transpiration; l'écart de température entre la feuille et l'air ne fut alors plus que de — 0°,4. Dans les conditions de l'expérience, le refroidissement des feuilles était donc dû sensiblement à parts égales au rayonnement et à la transpiration Ajoutons, d'ailleurs, qu'au cours de ces mesures, les grandes feuilles donnaient les plus grands écarts de température; au contraire, les petites feuilles, de faible masse calorifique, n'étaient guère plus froides que l'air ambiant.

C'est à ce moment, dans le courant de l'après-midi, lorsque le sous-bois est déjà dans l'ombre, alors que les cimes sont encore éclairées par le soleil, que l'on rencontre les plus fortes différences de température sur une verticale. Ainsi, le 16 mai, à 17 h. 30, par ciel clair et vent calme, les inscriptions ont fait ressortir une différence de 3°,8 entre l'abri à 9^{m},20 et celui à 1^{m},45. En réalité, cette différence était peut-être légèrement plus faible, compte tenu des erreurs dues aux abris; elle n'était certainement pas inférieure à 3°,5.

Mais déjà avant le coucher du soleil, les feuilles des couronnes ne sont plus toutes frappées par les rayons du soleil; il s'ensuit un refroidissement de l'air au niveau des couronnes, qui se propage à la fois vers le haut et vers le bas : au-dessus des couronnes, il y a renversement du gradient, en passant par l'isothermie, comme cela a lieu en terrain dégagé; d'autre part, les couronnes ne formant pas un écran étanche, l'air refroidi à leur contact tend à descendre et abaisse, par mélange, la température de toute la masse d'air comprise entre les couronnes et le sol.

Une fois le soleil couché, une feuille se refroidit d'autant plus au-dessous de la température de l'air qu'elle rayonne plus librement vers l'espace. Ainsi, le 25 mai, à 22 h. 15, par vent calme et ciel à moitié couvert par Ci, l'écart de température d'une feuille par rapport à l'air ambiant était de — 2°,5 dans les cimes, alors que sous les couronnes, cet écart n'était que de — 0°,4.

A l'aide du couple *D*, j'ai pu mesurer directement la différence de température entre deux feuilles placées, l'une au haut des couronnes, l'autre près du sol. Le plus grand écart a été constaté le 17 mai à 20 h. 26 (ciel clair, vent presque calme), où la feuille appartenant à la couronne était de 2°,6 plus froide que celle à 1^{m},50, alors que l'air était en haut de 0°,4 plus chaud que près du sol. Au contraire, le lendemain, par ciel couvert et vent d'une vitesse moyenne de 1,6 m/s, la différence de température entre la feuille d'en haut et celle d'en bas n'était plus que de — 0°,4

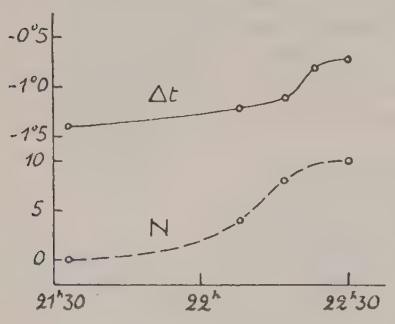

Fig. 33

L'influence de la nébulosité sur cette différence de température ressort nettement de l'observation suivante, faite le 19 mai, par vent calme : entre 21 h. 30 et 22 h. 30, tandis que le ciel, clair au début, se couvrait entièrement par A-Cu venant de l'Ouest, la différence en question passait graduellement de — 1°,4 à — 0°,7. La fig. 33 montre un parallélisme assez net entre l'augmentation de la nébulosité (*N*) et la diminution de l'écart de température (Δt) entre les deux feuilles.

La masse d'air qui se trouve à l'intérieur de la forêt est donc refroidie, à la fois, par le haut, grâce au courant d'air froid qui descend des couronnes, et à sa base, où le rayonnement des plantes voisines du sol produit une inversion. Il importe de remarquer que cette inversion reste toujours faible, car le rayonnement effectif des plantes ou feuilles du sous-bois est fortement diminué par les couronnes, et, d'autre part, le courant descendant tend constamment à détruire l'inversion en train de s'établir.

Je donnerai, à titre d'exemple, la répartition verticale à 22 h. 30, les 16, 17, 18 et 19 mai (fig. 34). Le vent était chaque fois calme. Les 16, 17 et 19, le maximum relatif apparaît très nettement à la base des couronnes, encadré par le minimum des couronnes et celui au sol. Le 16, le ciel était resté clair pendant

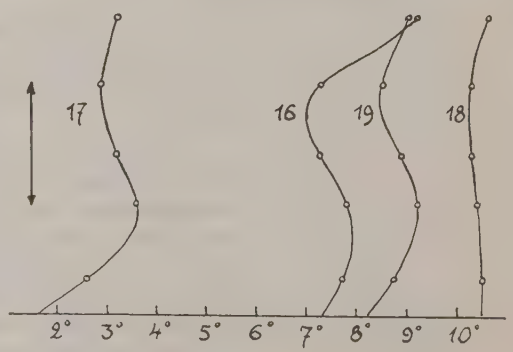

Fig. 34

[1]) En plein jour, si le ciel est clair, un corps protégé contre le rayonnement solaire, mais rayonnant librement vers le ciel, perd plus de chaleur, en un temps donné, par le rayonnement qu'il émet, qu'il n'en reçoit par le rayonnement de l'atmosphère qu'il absorbe. Voir J. v. Hann, *Lehrbuch der Meteorologie*, 2^{e} édition, 1915, p. 44 en bas.

toute la journée ; le profil thermique est donc très accentué et présente, notamment, une forte inversion au-dessus des couronnes (vent très faible, calme le soir). Le 17, le ciel était clair à 22 h. 30, mais avait été nuageux ou couvert pendant toute la journée ; les températures aux différents niveaux sont, en conséquence, notablement plus basses que la veille, et l'inversion au-dessus des couronnes est beaucoup moins prononcée (vent très faible, calme le soir). Le 18, le ciel, entièrement couvert pendant toute la journée, l'était encore à 22 h. 30, par vent modéré, puis faible ; l'échauffement diurne avait été fortement réduit, et le rayonnement nocturne l'était également ; aussi le gradient vertical est-il presque nul sur toute la hauteur du profil, et le minimum au sol fait-il entièrement défaut ; ce n'est qu'après 23 h. que l'inversion au sol apparaît, en même temps que s'accentue le minimum des couronnes. Enfin, le 19, par ciel clair ou très peu nuageux et vent presque calme, le profil est de nouveau plus accentué et présente la forme caractéristique de la nuit.

Les exemples que je viens de donner montrent bien que, pendant la nuit, il y a presque toujours, non pas isothermie, mais inversion entre le sol et la base des couronnes. L'exemple suivant montre que cette inversion est toujours beaucoup plus faible que celles que l'on observe en terrain découvert. Le tableau de chiffres ci-dessous et la fig. 35 indiquent la répartition des températures entre le sol et 2 m., a) *sur pré*, b) *en forêt* le 11 avril 1934, entre 18 h. 25 et 18 h. 45 (nébulosité 3 par Ci, vent calme).

	0m,10	0m,50	1m,00	1m,50	2m,00
Forêt	12°,5	12°,5	12°,7	12°,9	13°,1
Pré	7°,3	10°,1	11°,2	11°,6	11°,7
Diff. Forêt-Pré.....	+ 5°,2	+ 2°,4	+ 1°,5	+ 1°,3	+ 1°,4

Ces températures ont été déterminées par la méthode des thermomètres permutés ; l'échelle des ordonnées est ici quatre fois plus grande que sur les figures précédentes. Les deux stations se trouvaient à 50 m. de part et d'autre de la lisière d'un peuplement de pins, hauts d'une quinzaine de mètres. On voit : 1° qu'*au voisinage du sol*, et jusqu'à plus de 2 m., il fait plus chaud, la nuit, en forêt que hors forêt, et 2°, que l'inversion au sol, et surtout dans les premiers décimètres, est incomparablement plus faible en forêt que hors forêt.

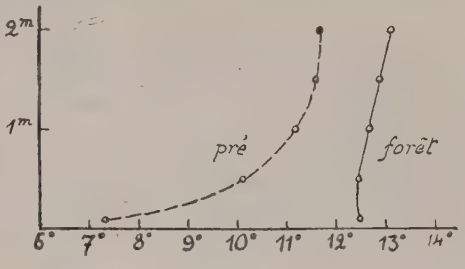

Fig. 35

Les plantes basses qui poussent sur le sol forestier se trouvent souvent — lorsque le minimum absolu est au sol — au niveau le plus froid de la forêt ; cependant, elles sont moins exposées aux gelées nocturnes que des plantes poussant à découvert : 1° près du sol, l'air est moins froid dans la forêt qu'en dehors ; 2° les couronnes empêchent les plantes près du sol de se refroidir, par rayonnement, notablement au-dessous de la température de l'air ambiant.

L'action protectrice de la forêt est surtout frappante lorsqu'on compare, après une nuit de gelée blanche, l'état des jeunes plants sous bois à l'état de ceux en pépinière. En effet, les pépinières sont fréquemment installées dans des clairières et constituent alors des exemples typiques de « *trous à gelée* », caractérisés par l'accumulation, au cours de la nuit, d'air froid ne trouvant aucune issue pour s'écouler. Les gelées blanches sont par conséquent plus fréquentes et plus intenses dans une pépinière en clairière, qu'elles ne le sont en terrain dégagé et *a fortiori* en forêt [1]).

Les différences entre la température de l'air en forêt et hors forêt donnent naissance à la *brise de forêt*, récemment étudiée par H. G. Koch (42). Par temps clair et absolument calme, cette brise souffle, au moment du coucher du soleil, de la lisière de la forêt vers les environs. Elle est due au fait qu'en forêt, la source principale d'air froid se trouve en hauteur ; sauf au voisinage immédiat du sol, l'air en forêt est donc plus dense, à un niveau donné, qu'au-dessus des champs, et tend, par conséquent, à sortir de la forêt. En terrain plat, la brise peut atteindre une vitesse de 1 m/s et peut être sensible jusqu'à une centaine de mètres de la lisière. Aussi, le gibier qui cherche, à cette heure, sa nourriture dans les champs ou prairies en bordure, flaire-t-il le chasseur à l'affût, à l'orée de la forêt.

On pourrait supposer qu'il s'établît un courant de compensation tout près du sol, car à ce niveau, l'air est plus froid hors forêt qu'en forêt (forte inversion hors forêt). Il n'en est rien : cette brise de retour est rendue impossible par le frottement au sol ; la brise de forêt descend, d'ailleurs, jusque près du sol. Le retour de l'air se fait donc par le haut, à partir de quelques mètres au-dessus des couronnes ; toutefois ce courant est très faible, car il intéresse une couche d'air plus importante que le courant sortant de la forêt.

Lorsque les terres en bordure de la forêt sont situées en contre-bas, l'influence de la gravité augmente l'intensité de la brise de forêt : Koch a mesuré des vitesses jusqu'à 2,5 m/s.

On s'attendrait à ce que cette brise se manifestât également pendant le jour, où la forêt est toujours plus froide que les alentours. On ne l'a jamais observée : pendant le jour, les courants de caractère général sont toujours trop forts et masquent le phénomène.

La transition du type nocturne au type diurne est l'inverse de celle du soir. Les rayons solaires frappent tout d'abord les cimes des arbres, c'est donc à ce niveau que l'air s'échauffe en premier lieu. Le minimum qui

[1]) Voir, à ce sujet, le *Bulletin de la Commission météorologique de la Moselle*, 1934, XV, p. 34.

se trouve généralement, la nuit, dans la partie supérieure des couronnes s'abaisse jusqu'à leur milieu ou jusqu'à leur base. Mais ce n'est que 1 à 2 heures plus tard que l'inversion au-dessus des couronnes fait place à une décroissance de température avec la hauteur. Le maximum de température est alors localisé dans les couronnes ; il y demeure tant que dure l'inversion sous les couronnes (ce qui peut être toute la journée), ou tant que le maximum près du sol n'est pas devenu prépondérant.

En forêt, le *maximum diurne* de la température ne se produit pas à la même heure aux différents niveaux. Les inscriptions obtenues au cours de 15 journées de mai et juin 1934 (ciel clair, nuageux ou couvert, pas de pluie) ont permis de calculer les températures moyennes à chaque niveau, de demi-heure en demi-heure, entre 12 h. 30 et 17 h. 30. Ces moyennes sont données dans le tableau ci-dessous.

Heure	Hauteur au-dessus du sol				
	1m,45	4m,45	6m,40	9m,2	11m,90
12 h. 30	20.62	20.76	21.15	20.98	20.33
13 h.	21.23	21.23	21.51	21.51	20.91
13 h. 30	21.57	21.57	21.90	21.98	21.42
14 h.	21.74	21.71	21.97	22.21	21.58
14 h. 30	22.11	22.06	22.31	22.50	22.05
15 h.	22.13	22.25	22.39	22.83	22.29
15 h. 30	22.09	22.33	22.47	22.83	22.33
16 h.	21.95	21.97	22.25	22.88	22.47
16 h. 30	21.54	21.49	21.90	22.62	22.20
17 h.	20.80	20.90	21.08	22.14	21.89
17 h. 30	20.09	20.15	20.27	21.34	21.19

Elles ont servi à tracer les courbes (fig. 36) représentant, aux différents niveaux, la variation diurne autour de l'heure du maximum. Sur ce graphique, le maximum de chaque courbe est marqué par une flèche. Les heures approximatives de ces maximums sont les suivantes :

Niveau..	1m,45	4m,25	6m,40	9m,20	11m,90
Heure...	15 h. 10	15 h. 20	15 h. 25	15 h. 40	15 h. 50

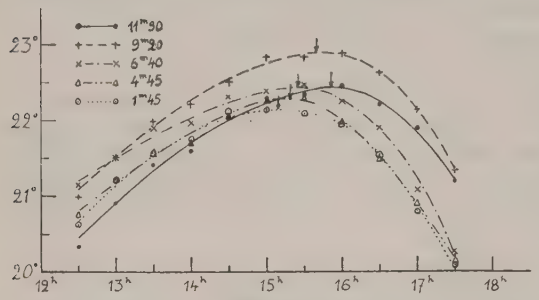

Fig. 36

Les heures du maximum se suivent dans l'ordre des niveaux croissants à partir du sol jusqu'au-dessus des couronnes ; cependant, il ne s'agit pas d'une onde thermique qui se propagerait du sol vers l'air libre, car, dans ce cas, il y aurait nécessairement décroissance de la température à partir du sol.

Les températures les plus élevées, et le maximum maximorum, se rencontrent au haut des couronnes (9m,20), qui constituent le *sol effectif principal* ; entre ce niveau et celui de 11m,90, la décroissance de la température et le retard du maximum sont ceux que l'on observe normalement en s'élevant dans l'atmosphère.

Sous bois, au contraire, le maximum se produit plus tôt que dans les cimes. Ceci s'explique par le fait que c'est vers le milieu de la journée que le rayonnement pénètre le plus à l'intérieur de la forêt ; le maximum dans les couronnes se produira plus tard, lorsque les rayons seront devenus assez obliques pour que les feuilles en interceptent la majeure partie.

On remarquera d'ailleurs, d'une manière générale, l'heure tardive à laquelle se produisent les températures maximums ; ce retard est une preuve de la très grande inertie thermique de la forêt.

La fig. 37 (p. 47) représente, sous forme de *chrono-isothermes*, la variation diurne de la température aux différents niveaux de la forêt ; elle permet donc de retrouver la plupart des résultats énoncés ci-dessus et met d'autres propriétés en évidence.

Les courbes sont basées sur les inscriptions obtenues au cours de 4 journées ensoleillées du mois de mai 1934 (1er, 17, 19 et 29). Toutes les moyennes horaires ont été « égalisées » (ou « harmonisées ») par application de la formule bien connue

$$t'_h = \frac{t_{h-1} + 2\,t_h + t_{h+1}}{4}.$$

Les courbes obtenues à l'aide de ces valeurs « égalisées » sont très régulières. Seules, les isothermes d'entre 18 et 20 h. ont dû être légèrement déplacées.

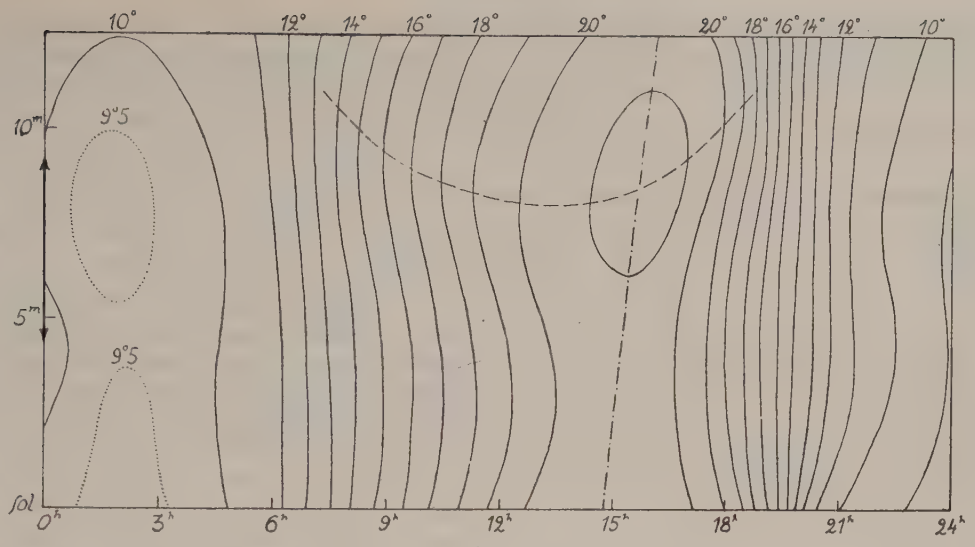

Fig. 37

Une anomalie cependant subsiste, qui est due à des variations anormales de la température le 17 et le 29 : le minimum de température a lieu vers 2 h., alors qu'il se produit normalement vers le moment du lever du soleil (lever du soleil au mois de mai, vers 4 h. 30 ; coucher du soleil, vers 19 h. 30).

Le graphique met en évidence les deux types essentiels de la répartition verticale : type diurne avec maximums dans les couronnes et au sol, type nocturne avec minimums à ces mêmes niveaux. Le trait mixte qui correspond au maximum de température à chaque niveau montre, par son inclinaison, le retard des couches d'air supérieures par rapport à celles voisines du sol. Enfin, le trait interrompu est le lieu des points où la température est, durant le jour, à chaque instant la plus élevée : le déplacement, au cours de la journée, du niveau du maximum dans les couronnes est des plus nets. Ce niveau étant déterminé par l'incidence des rayons solaires, il est le plus bas peu de temps après midi (vers 13 h. 30), mais ce n'est que beaucoup plus tard, vers 15 h. 30, que le maximum dans les couronnes atteint sa plus forte valeur.

Le maximum de température se trouve, par définition, à chaque instant au niveau du sol effectif. On retrouve donc ce résultat déjà énoncé précédemment (p. 20), savoir que le sol effectif n'est pas défini d'une façon absolue, mais que sa position dépend de plusieurs facteurs, et notamment de l'incidence des rayons solaires.

Les mesures faites à Hydra, en terrain dégagé (pp. 12 à 14), ont montré le parallélisme entre la *variabilité de la température* et l'énergie calorifique reçue, directement ou indirectement, par le rayonnement solaire ; ce parallélisme est double : 1° dans le temps : comme l'insolation, la variabilité est maximum peu après midi, alors que le maximum de température se produit notablement plus tard ; 2° dans l'espace : la variabilité est la plus forte au voisinage du sol, directement chauffé par le soleil.

Les inscriptions de température faites dans la Forêt de Haguenau m'ont permis de dégager, pour une forêt, des lois analogues à celles que je viens de rappeler.

Pour obtenir une expression numérique V de la variabilité de la température aux différents niveaux et à chaque heure, j'ai utilisé les 3 déterminations de température faites, chaque fois, 5 min. avant l'heure, à l'heure juste et 5 min. après : (t_{-5}, t, t_{+5}). J'ai formé, pour chaque heure, la différence seconde entre les trois valeurs successives ; je définis V comme la moitié de cette différence seconde, prise en valeur absolue :

$$2V = \left| (t_{+5} - t) - (t - t_{-5}) \right| ;$$

$$\text{d'où} \quad V = \left| \frac{t_{-5} + t_{+5}}{2} - t \right| .$$

V est donc égal, en valeur absolue, à l'écart, par rapport à t, de la demi-somme de t_{-5} et t_{+5} ; cet écart est nul si la température est stationnaire ou si elle varie linéairement. L'influence de la variation diurne, ou d'une variation régulière quelconque, se trouve donc éliminée, et la valeur de V est uniquement déterminée par les fluctuations accidentelles de la température.

Sur la fig. 38, les points représentent, pour chaque niveau, les moyennes horaires de V ; chacune de ces moyennes est tirée d'environ 20 valeurs individuelles ; seules, celles se rapportant au niveau de $0^m,40$ sont, pour la plupart, basées seulement sur 8 valeurs individuelles.

Bien que les observations n'aient pas été assez nombreuses pour donner de bonnes moyennes de V, et que, par conséquent, les points soient par endroits assez dispersés, la variation diurne de la variabilité apparaît nettement, et il est facile de tracer, entre les points, les courbes continues qui la représentent.

Ces courbes présentent toutes leur minimum le matin, sensiblement à la même heure, soit vers le lever du soleil.

Les maximums se produisent approximativement aux heures suivantes :

Niveau.....	$0^m,40$	$1^m,45$	$4^m,45$	$6^m,40$	$9^m,20$	$11^m,90$
Heure.....	11 h. 50	11 h. 50	12 h. 00	12 h. 30	13 h. 10	13 h. 40

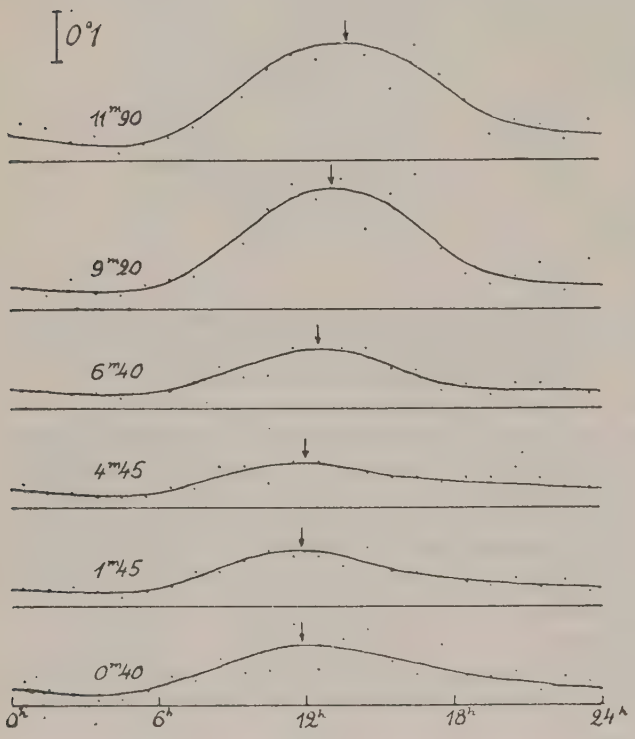

Fig. 38

L'ordre de succession (de bas en haut) est donc le même que pour les maximums de température (p. 46), et s'explique de la même façon ; mais, comme en terrain découvert et pour la même raison, le maximum de la variabilité précède notablement le maximum de température.

Les 3 courbes de la fig. 39 représentent la répartition verticale de la variabilité : a) pendant les 24 heures (moyenne des 24 valeurs horaires), b) pendant le jour (7 à 18 h.), c) pendant la nuit (19 h. à 6 h.).

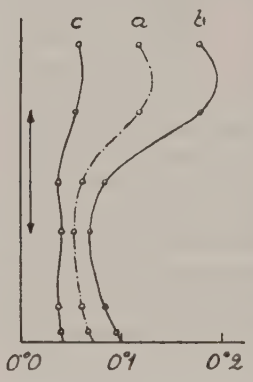

Fig. 39

La nuit, la variabilité est sensiblement la même à tous les niveaux (léger maximum au haut des couronnes) et très faible ; le jour, au contraire, elle est nettement la plus forte au haut des couronnes, qui constituent le *sol effectif*. Entre les couronnes et le sol, la variabilité est beaucoup plus faible ; elle présente un très léger maximum secondaire au voisinage du sol, qui joue le rôle de *sol effectif secondaire*. A la base des couronnes, où elle est minimum, la variabilité est 2,8 fois plus faible qu'au niveau des cimes.

Les mesures de variabilité, aussi bien en forêt qu'en terrain dégagé, montrent donc qu'il y a un rapport étroit entre la variabilité de la température en un point donné et la somme des échanges de chaleur dont il est le siège. Le terme « *activité thermique* », par lequel R. Geiger (32) a désigné la variabilité de température, se trouve donc pleinement justifié.

Il est intéressant de comparer les variations de température aux différents niveaux, dans deux circonstances particulières et opposées : *arrivée subite d'air chaud ou d'air froid*. La fig. 40 reproduit les inscriptions thermométriques du 5 avril 1934, de 20 h. à 22 h. (ciel clair ; vent presque calme). Il est utile d'indiquer qu'à cette date les arbres étaient encore entièrement dépourvus de feuilles. Néanmoins, l'air chaud ne pénètre presque pas à l'intérieur de la forêt, où la courbe de température continue à s'abaisser régulièrement. La différence de température entre $11^m,90$ et $1^m,45$ est de $4°,3$ à 21 h., alors qu'elle n'atteignait que $0°,8$ à 20 h. : une forte inversion se produit ; il y a par conséquent équilibre stable entre les couches d'air superposées, qui ne tendent pas à se mélanger.

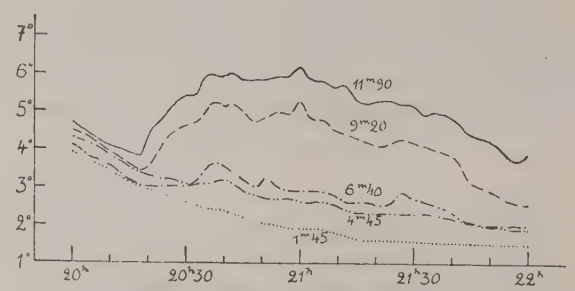

Fig. 40.

Le phénomène opposé a été observé le 1er juin (fig. 41). Le ciel était entièrement couvert par A-St et Ni, la vitesse moyenne du vent au-dessus des couronnes était de 1,5 m/s. Malgré la présence des feuilles dont le

développement est alors achevé, les couronnes ne constituent aucun barrage à la progression de l'onde thermique, qui s'inscrit aux différents niveaux par des courbes se confondant presque. L'air froid s'affaisse à l'intérieur de la forêt, de sorte que la répartition initiale de la température (maximum très prononcé au haut des couronnes, inversion à l'intérieur de la forêt) fait place à une répartition voisine de l'isothermie.

Il résulte des observations relatées ci-dessus que, même dépourvues de feuilles, les couronnes constituent une séparation très nette entre les masses d'air au-dessus et au-dessous d'elles, à condition que celles-ci soient réparties par ordre de densités décroissantes à partir du sol ; dans le cas contraire, l'effet des couronnes est nul.

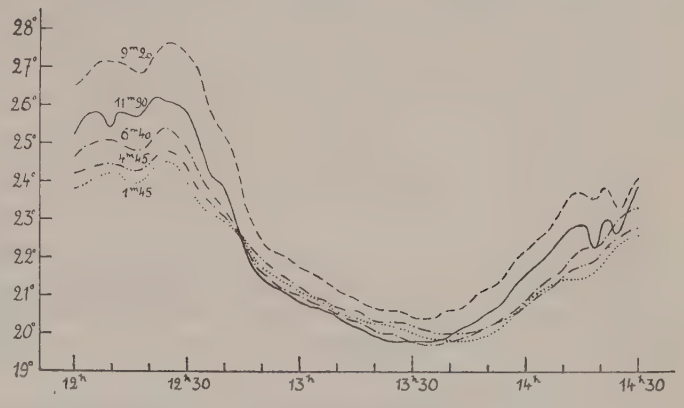

Fig. 41.

RÉSUMÉ.

Les inscriptions de température effectuées au-dessus, au milieu et au-dessous des couronnes d'une chênaie ont permis d'étudier la *répartition verticale de la température en forêt* ; cette répartition dépend de *l'heure des conditions météorologiques et de la densité du couvert.*

J'ai pu, en particulier, mettre en évidence les caractères suivants du climat forestier :

1° *Pendant la nuit, il y a, entre les couronnes et le sol, inversion de température,* et non pas isothermie comme on l'admettait jusqu'à présent ; cette inversion, relativement faible, il est vrai, est due au rayonnement — non négligeable — du sol et des végétaux qui se trouvent près du sol, ainsi qu'à la transpiration des feuilles et à l'abaissement de température qui en résulte par suite de l'évaporation.

2° *Les maximums de température ne se produisent pas au même moment aux différents niveaux de la forêt, mais se succèdent de bas en haut.* Cette succession s'explique par le fait que c'est vers le milieu de la journée que les rayons solaires pénètrent le plus à l'intérieur de la forêt ; c'est donc ici que la température atteindra le plus tôt son maximum ; au contraire, le maximum au niveau des couronnes aura lieu plus tard, lorsque les rayons solaires seront devenus plus obliques et seront, par conséquent, davantage absorbés par les couronnes.

3° *La variabilité de la température en forêt présente une variation diurne très nette ; le minimum de la variabilité se produit à tous les niveaux en même temps, soit au moment du lever du soleil ; les maximums de variabilité ont lieu peu de temps après midi, et se suivent, comme les maximums de température, de bas en haut.*

Enfin, la variabilité est à chaque instant la plus forte à la partie supérieure des couronnes, qui constituent le *sol effectif principal.* Ces observations montrent que *la variabilité de la température de l'air est,* en forêt comme à découvert, *fonction de l'énergie absorbée.*

4° *Même dépourvues de feuilles, mais par vent faible, les couronnes empêchent toute invasion d'air chaud à l'intérieur de la forêt ; au contraire, un refroidissement brusque de l'air se fait sentir immédiatement en forêt, même après le développement des feuilles.* Les couronnes ne constituent donc un écran entre deux masses d'air différentes que lorsque celles ci sont réparties *par ordre de densités décroissantes à partir du sol.*

QUATRIÈME PARTIE.

NOTES SUR LA TEMPÉRATURE DES VÉGÉTAUX.

1° Exposé du mode opératoire.

Il a déjà été question, dans les chapitres précédents, de la mesure de la température propre des végétaux ; j'exposerai ici l'ensemble des résultats que j'ai obtenus sur ce sujet, au cours de mes recherches.

La méthode thermo-électrique est très précieuse pour de pareils travaux, grâce à la rapidité avec laquelle elle permet d'effectuer les mesures, et grâce au volume très réduit de l'organe thermométrique qui permet d'opérer dans des conditions où l'emploi du thermomètre ordinaire serait très délicat ou même impossible. Ajoutons qu'il est possible, actuellement, de constituer, pour une somme relativement modique, un matériel thermo-électrique robuste et d'une précision bien suffisante.

Différents procédés de mesure peuvent être adoptés. Au lieu d'évaluer la température des plantes directement, en plongeant la soudure de référence dans un bain de température connue, on peut mesurer l'écart de température entre la plante et l'air ; dans ce cas, la soudure de référence est placée dans l'une des tubulures d'un psychromètre Assmann ou, la nuit, simplement sous un écran Budig qui l'empêche de rayonner.

Lorsqu'on emploie cette méthode différentielle, il faut veiller à ce que les deux soudures se trouvent toujours au même niveau, à cause des valeurs élevées que présente le gradient thermique au voisinage du sol, le jour comme la nuit. Il faut cependant éviter de trop les rapprocher l'une de l'autre ; la nuit, l'écran entraverait le rayonnement de l'élément étudié, tandis que le jour, ce dernier serait ventilé par les remous d'air produits par le psychromètre. Dans l'un et l'autre cas, l'écart de température mesuré serait trop faible, car la température de la plante se rapprocherait de celle de l'air.

Je me suis presque toujours placé, en faisant les mesures rapportées ci-dessous, au point de vue purement physique : mon but était de montrer l'influence des facteurs météorologiques sur la température des végétaux ; seules, quelques observations relatives à la «fièvre» des bourgeons, qui seront signalées à propos des mesures faites dans la Forêt de Haguenau, empiètent sur le domaine proprement biologique.

2° Description des résultats obtenus.

Les premières mesures ont été effectuées **à Barr,** au cours de l'été 1933, et ont porté sur des *feuilles de vigne,* ainsi que sur des *grains de raisin.*

La soudure, quoique de très faibles dimensions, n'a pas pu être introduite dans le limbe d'une feuille; j'ai dû me borner à la maintenir en contact intime avec la face de la feuille dirigée vers le sol. Quant aux grains de raisin, dont la température n'est pas uniforme, la soudure a été amenée aussi près que possible du centre, et toujours dans le plan limitant la moitié du grain éclairée par le soleil.

Les mesures faites *de nuit,* au courant des mois de juillet et août, ont donné de faibles écarts entre la température des feuilles ou grains et celle de l'air. L'air était toujours, sinon saturé, tout au moins très riche en vapeur d'eau ; le refroidissement des végétaux par rayonnement était donc relativement faible ; en cas de dépôt de rosée, il était encore réduit par la chaleur de condensation libérée. De même, la gelée blanche, généralement incriminée, à tort, de porter préjudice aux cultures, les protège au contraire en arrêtant l'abaissement de leur température : si l'air est trop sec pour donner lieu à un dépôt de gelée blanche, les dégâts sont plus importants pour une même température de l'air.

Voici quelques résultats de mesures :

Le 18 juillet, de 3 h. 30 à 5 h. 30, j'ai étudié la température de feuilles et de leurs tiges pouvant rayonner librement et se trouvant à différentes hauteurs au-dessus du sol ; nébulosité 8 (Ci-St, Cu), vent presque calme ; température de l'air, à 4 h. 30 : 11°,4, à 5 h. 20 : 12°,2 ; humidité relative : 98 % ; forte rosée.

Il n'y a presque pas de différence entre la température d'une feuille ou d'une tige et celle de l'air au même niveau : l'écart, toujours très faible, est en moyenne de —0°,2 ; pendant une accalmie momentanée, il atteint —0°,6.

Des écarts du même ordre de grandeur sont mesurés les 4 et 27 août, vers 4 h. 30 : le ciel est clair ou peu nuageux, et le vent très faible ou presque calme, mais l'air saturé de vapeur d'eau.

Au contraire, le 31, dans les mêmes conditions de nébulosité et de vent, l'humidité relative n'est que de 72 % ; l'écart mesuré sur une feuille de vigne atteint —1°,3.

Dans des conditions identiques, une petite feuille atteint une température plus basse qu'une grande : en effet, de deux corps semblables, c'est le plus petit dont la surface, comparée au volume, est la plus grande ; il se refroidit, par conséquent, davantage par rayonnement. Telle est une des raisons pour lesquelles une prairie se couvre de gelée blanche plus tôt qu'un champ voisin, fait d'observation courante. Ainsi, des comparaisons successives ont donné, pour une grande feuille de vigne, un écart de —0°,5 à —1°,1 par rapport à l'air, mais pour une petite feuille, un écart de —1°,0 à —1°,3. La petite feuille était donc en moyenne de 0°,35 plus froide que la grande (mesures du 31 août).

Cette observation paraît être en contradiction avec les mesures faites en forêt (p. 44), où la feuille la plus grande présentait le plus grand écart de température par rapport à l'air ambiant. La contradiction n'est qu'apparente ; sous bois, les feuilles ne rayonnent pas librement et se refroidissent, par conséquent, moins qu'en terrain dégagé ; une petite feuille, de faible masse calorifique, ne peut pas se refroidir autant qu'une feuille de dimensions supérieures.

Dès qu'ils sont *frappés par les rayons du soleil* ou par la lumière diffuse du ciel, les feuilles ou les grains s'échauffent au-dessus de la température de l'air ambiant. L'écart entre les deux températures est d'autant plus grand que le rayonnement reçu est plus intense et que le vent est plus faible. Des écarts de 5° sont facilement atteints, même en dehors des heures où le rayonnement du soleil est le plus fort. Ainsi, le 28 août à 10 h. 10, par ciel clair et vent soufflant d'Est avec une vitesse moyenne de 1,1 m/sec., un grain de raisin exposé au soleil était de 5 à 10° plus chaud que l'air, selon la force instantanée du vent. Au contraire, le lendemain, approximativement à la même heure, mais par ciel couvert par Ci denses, l'écart de température ne dépassa pas 6°,5.

La température d'un organe quelconque d'un végétal suit d'autant plus fidèlement les variations du rayonnement reçu que cet organe est plus petit et qu'il a, par conséquent, une plus faible inertie thermique.

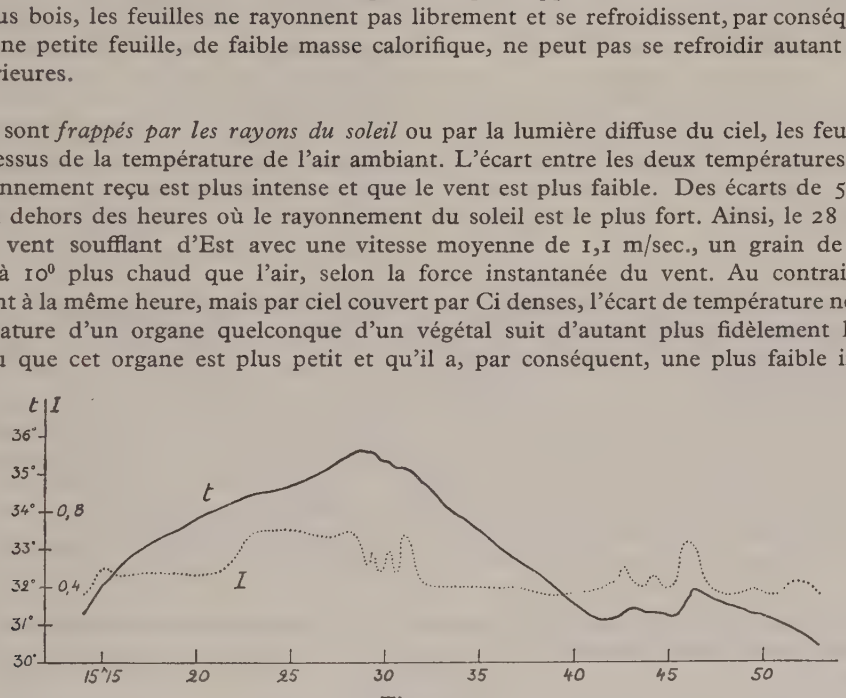

Fig. 42.

A titre d'exemple, la fig. 42 montre les variations de la température t d'un grain de raisin, par ciel moitié couvert par bancs d'A-Cu denses et par Cu (31 août, 15 h. 14 à 15 h. 54 ; vent calme). La courbe en pointillé représente les variations du rayonnement total reçu I (soleil et ciel), mesuré au solarimètre Gorczyński, et exprimé en cal/cm²/min. La température de l'air, mesurée à 1m,50 du sol, était de 25°,8, l'humidité relative de 36 % (15 h. 30). Le grain étudié se trouvait à 50 cm. au-dessus du sol, bien exposé aux rayons du soleil.

Le grain de raisin ayant été choisi assez gros, la température mesurée suit très mollement les variations de l'insolation. Ainsi, après l'échauffement qui a duré de 15 h. 22 à 15 h. 32, l'équilibre thermique avec l'air ambiant n'est pas encore atteint à 15 h. 42, soit 10 min. après la diminution du rayonnement. A 15 h. 46, le solarimètre indique un maximum très bref du rayonnement ; le grain n'atteint sa température maxima qu'après 30 sec. environ, temps que met l'onde thermique pour pénétrer jusqu'au centre où se trouve la soudure. On voit donc que la température d'un grain de raisin chauffé par le soleil est loin d'être uniforme.

Il a été intéressant d'étudier la température des feuilles ou grains se trouvant à l'ombre des feuilles périphériques du cep.

Ces températures diffèrent en général peu de celle de l'air ; les écarts, qui ne dépassent guère 2°, sont positifs ou négatifs, selon que l'élément mesuré est voisin de parties directement chauffées par le soleil ou qu'il est, au contraire, complètement enrobé par les feuilles extérieures.

Il y a exception pour les feuilles ou grains voisins du sol, qui sont nettement plus froids que l'air au même niveau. Pour un grain de raisin à 12 cm. au-dessus du sol, l'écart atteignit, à plusieurs reprises, —5° (observations du 29 août) [1]). L'air libre est caractérisé, au voisinage du sol, par une très rapide décroissance de la température avec la hauteur, conséquence du fort échauffement du sol. Au contraire, les plants de vigne jouissent d'un climat particulier, caractérisé par un moindre gradient vertical. En effet, la masse d'air enveloppée par le feuillage est partiellement à l'abri des influences extérieures ; notamment, elle ne subit pas au même titre que l'air extérieur, l'échauffement à partir de la surface du sol.

Des mesures faites **à Alger,** en 1934 et 1935, montrent comment varie, par ciel clair, la température des plantes en même temps que celle de l'air ambiant. Ces mesures ont été effectuées à l'aide du couple *BC*.

On retrouve, en général, les mêmes oscillations sur les deux courbes ; selon la masse calorique de la feuille ou de la portion de feuille considérée, les oscillations sont les plus prononcées sur l'une ou sur l'autre. Mais ces oscillations se produisent avec un décalage qu'il est intéressant d'étudier.

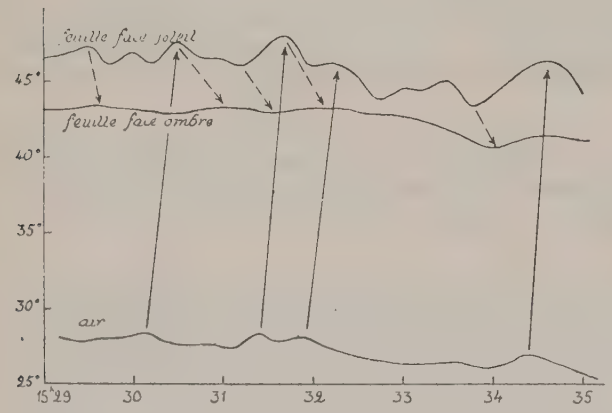

Fig. 43.

La journée du 3 septembre 1934 (ciel clair, vent très faible) servira d'exemple. J'ai mesuré simultanément, à 65 cm. au-dessus du sol, la température de l'air, celle de la face ensoleillée d'une *feuille d'agave,* et celle de la face à l'ombre de la même feuille (fig. 43). Les mesures étaient faites à tour de rôle, toutes les 5 secondes, de sorte que les points de chaque courbe sont espacés de 15 secondes.

La température de la face ensoleillée de la feuille d'agave demeure toujours la plus élevée; elle dépasse de 17 à 20° celle de l'air. La face opposée au soleil est en moyenne d'environ 3° plus froide que la face ensoleillée (épaisseur de la feuille d'agave : 9 mm.).

On retrouve les mêmes ondulations, plus ou moins amorties et plus ou moins déphasées, sur les trois courbes. Les flèches en trait plein montrent leur retard sur la courbe « face au soleil » par rapport à la courbe relative à la température de l'air. Ce décalage semblerait indiquer que les variations de température de la feuille dépendent de celle de l'air. Cependant, le fait que ces variations sont plus prononcées sur la face ensoleillée de la feuille que dans l'air, montre qu'il s'agit d'un phénomène plus complexe. En réalité, les variations de la température de l'air et celles de la température de la feuille sont commandées, les unes et les autres, par les variations de la vitesse du vent. Tout accroissement de cette vitesse entraîne, à la fois, par suite du brassage, un abaissement quasi-instantané de la température de l'air; par suite de la ventilation, un abaissement — généralement plus marqué — de la température de la feuille. Ce dernier sera d'autant plus fort que la température de la feuille aura, précédemment, dépassé davantage celle de l'air, et d'autant plus lent que la masse calorique de la feuille sera plus élevée.

Les flèches en trait interrompu montrent le retard qu'ont les variations de température de la face à l'ombre par rapport à celles de la face ensoleillée de la feuille ; il correspond au temps de propagation de l'onde thermique d'une face à l'autre.

La fig. 44 (25 avril 1935, 8 h. 37; nébulosité 6 par Fr-Cu, vent 0,8 m/sec.) fait voir l'effet du passage de nuages devant le soleil ; dès qu'elle se trouve à l'ombre (bande supérieure couverte de hachures), la feuille se refroidit de plusieurs degrés (4° en 1 min., à 8 h. 39), alors que la température de l'air varie beaucoup moins ; les deux courbes présentent parfois des variations analogues, mais ce sont, cette fois, les variations de température *de l'air* qui sont *en retard* sur celle de l'agave : la température de l'air dépend de la température du sol ou des plantes et n'est affectée qu'indirectement par les variations de l'insolation.

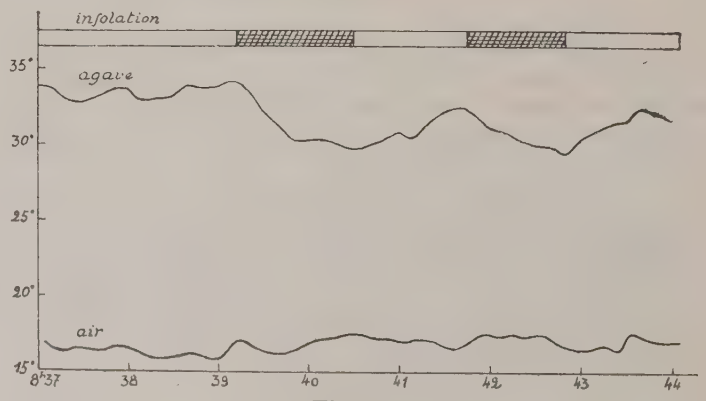

Fig. 44.

---

[1]) La soudure de référence se trouvait naturellement en dehors du plant de vignes.

Des mesures de température ont été effectuées, en juillet 1934, dans un *champ de froment*, près de **Strasbourg.**

J'ai d'abord déterminé la différence de température que peut présenter une tige par rapport à l'air au même niveau à l'intérieur du champ. La soudure a été piquée d'abord juste au-dessous de l'épi, soit à environ 70 cm. au-dessus du sol.

Le plus fort écart a été de $+6^{\circ},6$ par ciel clair et vent de vitesse 1,3 m/sec., le 17 juillet, à 9 h. 08. L'intensité du rayonnement reçu sur le plan horizontal était de 0,68 cal/cm²/min.

Une augmentation de vent (à 2 m. du sol) de 1,6 à 1.8 m/sec. a ramené l'écart de $+2^{\circ},5$ à $+1^{\circ},5$, dans des conditions par ailleurs identiques.

J'ai répété les mêmes mesures à 40 cm., puis à 7 cm. au-dessus du sol. Elles ont montré qu'il n'y a pas de différence appréciable entre les écarts de température mesurés aux différents niveaux. A l'intérieur du champ, où les mouvements de l'air sont très peu importants, la température de l'air est donc essentiellement fonction de celle des tiges.

Il était intéressant aussi de comparer, à différents niveaux, la température de l'air dans le champ et à l'extérieur du champ. Pour cette mesure, j'avais introduit les deux soudures du couple *D* chacune dans l'une des tubulures de deux psychromètres à aspiration, que j'ai suspendus à deux mètres de part et d'autre du bord du champ. Les épis se trouvaient à environ 1 m. au-dessus du sol. Au niveau de $1^{m},30$, la différence de température était très variable et changeait fréquemment de signe ; elle était nulle en moyenne. A $0^{m},80$, l'écart était en moyenne de $1^{\circ},0$, la température étant plus élevée dans le champ que hors le champ (vitesse du vent, à 2 m. du sol, 1,5 m/sec., insolation 0,95 cal/cm²/min.). A 10 cm. du sol, l'écart était compris entre 2 et 4°, pour une insolation de 0,70 cal/cm²/min.

Ces mesures montrent à quel point le climat d'un champ de céréales peut différer de celui d'un terrain nu. La répartition verticale des températures n'est d'ailleurs pas comparable à celle que l'on observe en forêt ; en effet, les couronnes des arbres forment, en forêt, un écran qui absorbe la majeure partie du rayonnement reçu, au détriment de l'intérieur de la forêt. Dans un champ de céréales, au contraire, où rien ne correspond aux couronnes des arbres, le rayonnement est surtout absorbé par les tiges, et l'est à peu près également à tous les niveaux.

Dans la chênaie de la **Forêt de Haguenau** où j'ai effectué les mesures relatées dans la III^e^ partie, les mesures thermo-électriques ont porté sur les plus *petites branches*, de quelques millimètres de diamètre, sur les *bourgeons* et sur les *feuilles*.

Le jour, au soleil comme à l'ombre, le bois est plus chaud que l'air qui l'entoure ; l'écart de température est plus grand pour le bois mort que pour le bois vert. Inversement, la nuit, le bois mort est plus froid que le bois vert, lui-même plus froid que l'air. Ainsi, le 11 avril, à 14 h. 07, et au soleil, une petite branche de bois mort était en moyenne de 8° plus chaude que l'air ambiant, mais une jeune pousse seulement de 4° ; l'écart de température entre les 2 branches était compris entre 3° et 6°. En augmentant la capacité et la conductibilité caloriques du bois, la sève exerce, par conséquent, une action régulatrice sur sa température ; en outre, pendant le jour, la transpiration contribue à l'abaissement de la température.

A l'aide du couple *D*, j'ai pu vérifier que les bourgeons se trouvent à une température supérieure à celle de petites branches de dimensions comparables et exposées de la même façon.

Les plus grands écarts ont été observés le 17 avril, journée exceptionnellement chaude (maximum 30°), au cours de laquelle les bourgeons se sont très fortement développés. Le bourgeon étudié avait un diamètre de 5 mm., une longueur de 15 mm. environ ; la branche, un diamètre de 4 mm. ; les deux se trouvaient à la partie supérieure des couronnes.

A 13 h. 25, l'écart de température du bourgeon par rapport à la branche était compris entre $2^{\circ},0$ et $2^{\circ},5$ (vent 1,6 m/sec.). Il importe de signaler que pendant toute la journée, le ciel est resté très nuageux ou couvert (Ci, A-Cu), et qu'en particulier, au moment de cette mesure, le soleil était caché par les nuages. L'écart de température doit donc être expliqué uniquement par une « *crise de fièvre* » des bourgeons, analogue à celle constatée par M. L. Blaringhem (9) sur les boutons de pois de senteur. Le même jour, à 16 h. 35, la différence de température entre bourgeons et branches était de $1^{\circ},5$; elle était sensiblement plus faible au cours de la nuit suivante (inférieure à $0^{\circ},5$), montrant le ralentissement nocturne de la végétation. Enfin, le lendemain, l'écart n'a pas dépassé 1° ; la température de l'air étant restée inférieure à 21°, les bourgeons se sont moins développés ce jour que la veille.

La « fièvre » est la plus forte au moment où les bourgeons s'ouvrent, ainsi qu'en témoignent les températures ci-dessous, mesurées le 1^er^ mai, à 10 h. 35 (température de l'air : $24^{\circ},0$).

Petit bourgeon	25 à 26°
Bourgeon s'ouvrant	supérieure à 27°
Bourgeon déjà ouvert (petites feuilles)	$25^{\circ},5$ à $26^{\circ},5$

L'emploi du couple thermo-électrique différentiel est particulièrement approprié à de pareilles mesures :

il permet de comparer directement l'organe étudié (bourgeon, fleur), à un autre organe, « *neutre* », de la plante ; l'échauffement des tissus au-dessus de la température de l'air ambiant se trouve ainsi éliminé automatiquement, et le galvanomètre indique immédiatement l'effet de la « crise de fièvre » (à condition, bien entendu, que les deux organes que l'on compare se trouvent toujours dans les mêmes conditions d'émission ou d'absorption de rayonnement).

3° Conclusions.

Il résulte des mesures que j'ai rapportées que la température des végétaux peut différer très sensiblement de celle de l'air ambiant, le jour comme la nuit, l'écart étant positif le jour et négatif la nuit. L'amplitude diurne de la température d'un végétal est donc supérieure à celle de l'air. Or, seule la température des tissus organiques eux-mêmes peut servir de base à une étude de biologie végétale, et l'on s'écarte, dans certains cas, très sensiblement de la réalité physique en substituant, à cette température, celle de l'air libre.

Pour une étude particulière, la méthode thermo-électrique sera toujours employée avec avantage. Mais il y aurait intérêt, d'autre part, à introduire la mesure de la température des végétaux dans les observations météorologiques courantes, de façon à caractériser le « *climat végétal* » d'une région. Plusieurs méthodes peuvent alors être adoptées.

Une première solution consisterait à choisir une plante standard, qui serait cultivée dans les diverses stations météorologiques, et dont on mesurerait la température, par voie thermo-électrique par exemple, dans des conditions rigoureusement fixées d'avance.

Mais au lieu d'opérer sur les végétaux eux-mêmes, plusieurs auteurs ont préconisé l'emploi d'un « *corps type* », librement exposé à l'air, et dont la température est censée différer peu de celle d'une partie de végétal de dimensions voisines. Des mesures exécutées dans ces conditions ont l'avantage d'être rigoureusement comparables entre elles, à la fois dans le temps, pour une station donnée, et dans l'espace, d'une station à l'autre.

R. Geiger (30) a réalisé le dispositif suivant : Un cylindre en nickel, de 5 mm. de diamètre et d'une longueur de 45 mm., est suspendu à l'air libre ; l'une des branches d'un pont de Wheatstone est logée dans ce cylindre et permet d'en enregistrer la température d'une manière continue. L'installation comportait d'ailleurs plusieurs « corps types », qui étaient suspendus à des niveaux croissants et qui étaient alternativement mis en circuit avec le dispositif enregistreur.

L'auteur a montré ainsi la grande dispersion de la température du corps type au voisinage du sol, conséquence de la forte dispersion de la température de l'air au même niveau. Cette propriété est l'une des caractéristiques essentielles du climat de la couche d'air voisine du sol ; aussi convient-il, pour définir le climat à faible hauteur plus encore que pour caractériser celui au niveau de l'abri, de donner, non pas la moyenne des températures observées, mais les valeurs extrêmes entre lesquelles ces températures sont comprises [1]) ; à la courbe représentant la variation diurne moyenne de la température, l'auteur substitue la « *bande de température* », limitée, de part et d'autre, par les courbes enveloppant les températures extrêmes.

Le corps type peut aussi être constitué par le réservoir d'un thermomètre météorologique ordinaire, exposé à l'air libre. Dans ce cas, le thermomètre n'indique pas, bien entendu, la température de l'air, mais une température qui est fonction, à la fois, de la température de l'air, du rayonnement reçu et de la vitesse du vent : MM. C. E. Brazier et L. Éblé (11) ont proposé, pour cette grandeur, le nom d'« *indice actino-thermique* ».

La température indiquée par le thermomètre dépend, en outre, des caractéristiques de cet instrument et des conditions dans lesquelles il est installé ; pour rendre les mesures comparables entre elles, il est donc indispensable de choisir un modèle unique de thermomètre (nature du thermomètre ; forme, dimensions et couleur du réservoir), qui servira dans toutes les stations ; il sera d'ailleurs intéressant de disposer une série de pareils thermomètres à des niveaux croissants au-dessus du sol.

La température indiquée par un thermomètre de ce genre ne se comportera cependant jamais, dans ses variations, exactement comme celle de tel ou tel organe végétal ; parmi les nombreux facteurs qui entrent ici en ligne de compte, il faut signaler notamment celui-ci : un végétal transpire ; de ce fait, sa température sera, en général, inférieure à celle d'un corps pour le reste identique, mais sec ; en outre, elle dépendra de l'humidité de l'air. On se rapprocherait peut-être davantage de la réalité en maintenant légèrement humide le réservoir du thermomètre servant de corps type, ou, mieux, en maintenant mouillée une fraction de la surface du réservoir.

Quel que soit le dispositif adopté, la mesure de la température d'un corps exposé au rayonnement paraît devoir donner d'utiles indications sur le climat végétal d'un endroit : les températures déterminées par ce procédé sont la résultante de divers facteurs, que des raisons d'ordre pratique empêcheraient souvent d'évaluer séparément et dont il est difficile de calculer l'effet total ; or, la croissance des végétaux paraît dépendre en première ligne précisément de cette résultante ; il paraît donc intéressant de mesurer *l'indice actino-thermique* d'une façon régulière, notamment dans les stations de météorologie appliquée.

---

[1]) On peut rappeler ici le terme « *expression de la température* », créé en 1904 par G. Eiffel pour la valeur $E = \frac{M+m}{2} + \frac{M-m}{2}$, où M et m sont respectivement le maximum et le minimum moyens d'un mois.

Mais il ne faut pas perdre de vue que cet indice n'est pas la mesure d'une grandeur physique bien définie ; pour cette raison, il importe avant tout que les méthodes employées soient partout rigoureusement identiques. D'autre part, l'indice actino-thermique, qui dépend essentiellement de la force du vent, très variable d'un point à l'autre, surtout à proximité du sol, caractérise un climat *local* dans le sens le plus étroit de ce terme.

RÉSUMÉ.

La température propre des végétaux dépend de diverses conditions, qui sont, notamment, la température de l'air, l'intensité du rayonnement reçu ou émis et la vitesse du vent ; les résultats de *mesures thermo-électriques* effectuées *sur des grains de raisin, des feuilles de vigne et des feuilles d'agave* sont données à titre d'exemples.

A l'intérieur d'un *champ de froment*, l'écart de température entre la tige et l'air ambiant ne varie pas d'une manière appréciable avec la hauteur ; *la température de l'air dans le champ dépend donc essentiellement de celle des tiges. L'air à l'intérieur du champ est, le jour, de plusieurs degrés plus chaud que l'air hors du champ au même niveau.*

Dans la Forêt de Haguenau, j'ai pu, en mesurant la température des *bourgeons de chênes*, vérifier l'existence d'une « *crise de fièvre* », *qui est la plus forte au moment de l'ouverture des bourgeons, et qui tombe le soir.* J'ai constaté, en outre, une différence nette entre la température du *bois mort* et celle du *bois en sève.*

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE.

Abréviations : La Mét. = La Météorologie ;
Met. Ztschr. = Meteorologische Zeitschrift ;
M. W. Rev. = Monthly Weather Review.

1) Albrecht, Fr. : *Thermometer zur Messung der wahren Lufttemperatur.* Met. Ztschr. 1927, p. 420.
2) Alter, J. C. : *Some effects of surface slope on climate.* M. W. Rev. 1912, p. 929.
3) Ångström, A. : *Die Konvektion der Luft.* Met. Ztschr. 1919, p. 348.
4) Ångström, A. : *Einige Bemerkungen zu meinen Studien zum Frostproblem, mit besonderer Berücksichtigung eines Referats von W. Schmidt.* Met. Ztschr. 1922, p. 361.
5) Ångström, A. : *Mesure de la température des couches les plus basses de l'atmosphère.* La Mét. 1930, p. 179.
6) Ångström, A. : *On the radiation and temperature of snow and the convection of the air at its surface.* Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik 1919, N° 21.
7) Ångström, A. : *Ueber die Gegenstrahlung der Atmosphäre.* Met. Ztschr. 1916, p. 529, et 1917, p. 14.
8) Bender, C. : *Die Frühjahrsfröste im Unterelbegebiet und ihre Bekämpfung.* Zeitschrift für angewandte Meteorologie 1932, p. 39.
9) Blaringhem, L. : *La température des fleurs.* Comptes-rendus des séances de l'Académie des Sciences 1934, 2me semestre, p. 501.
10) Brahard, A. : *Un curieux mouvement tourbillonnaire. La cloche volante.* Comptes-rendus des séances de la Société Météorologique de France 1933, p. 96.
11) Brazier, C. E., et Éblé, L. : *Introduction à l'étude des températures de l'air et du sol au voisinage de la surface terrestre.* La Mét. 1934, p. 97.
12) Brückmann, W. : *Ueber Versuche der Registrierung der Oberflächentemperatur des Bodens mit elektrischen Thermometern.* Tätigkeitsberichte des preussischen meteorologischen Institutes 1917-1919, p. 111.
13) Budig, W. : *Beschirmung von Bodenthermometern gegen nächtliche Ausstrahlung.* Ergebnisse der meteorologischen Beobachtungen in Potsdam 1915, p. XI.
14) Büdel, A. : *Der Strahlungsschutz am Thermometer.* Zeitschrift für angewandte Meteorologie 1933.
15) Chambrelent, J. F. : *Les effets de la gelée et de la sécheresse sur les récoltes de l'année 1892, et des moyens tentés pour combattre le mal.* Comptes-rendus des séances de l'Académie des Sciences 1892, 2e semestre, p. 92.
16) Chaptal, L. : *Contribution à l'étude de la prévision des minima nocturnes.* Comptes-rendus des séances de l'Académie d'Agriculture 1926, p. 409.
17) Cox, H. J. : *Thermal belts and fruit growing in North Carolina.* M. W. Rev. 1923, supplément N° 19.
18) Cuif, E. : *Météorologie comparée agricole et forestière.* Bulletin de la Société des Sciences de Nancy 1913, fasc. III.
19) Defant, A. : *Die nächtliche Abkühlung der unteren Luftschichten und der Erdoberfläche in Abhängigkeit vom Wasserdampfgehalt der Atmosphäre.* Sitzungsberichte der Wiener Akademie 1916, Abteilung IIa, p. 1537.
20) Defant, A. : *Ueber die nächtliche Abkühlung der untersten staubbeladenen Luftschichten.* Annalen der Hydrographie 1919, p. 93.
21) Delcambre, E. : *La température et les gelées.* La Mét., Juillet et Août 1931, p. 49.
22) Eckert, F., et v. Lorenz-Liburnau, J. : *Untersuchungen über die Temperatur und die Feuchtigkeit der Luft unter, in und über den Baumkronen des Waldes, sowie im Freilande.* Anal. dans Met. Ztschr. 1890, p. 361.
23) Falckenberg, G. : *Absorptionskonstanten einiger meteorologisch wichtiger Körper für infrarote Wellen.* Met. Ztschr. 1928, p. 334.
24) Falckenberg, G. : *Der Einfluss der Wellenlängentransformation auf das Klima bodennaher Luftschichten und die Temperatur der freien Atmosphäre.* Met. Ztschr. 1931, p. 341.

25) Falckenberg, G. : *Der nächtliche Wärmehaushalt bodennaher Luftschichten.* Met. Ztschr. 1932, p. 369.
26) Gassies, J. P. : *Une expérience de protection contre la gelée.* La Mét. 1932, p. 483.
27) Gehlhoff, K. : *Thermoelektrische Messung des nächtlichen Temperaturverlaufes in den unteren Luftschichten.* Met. Ztschr. 1922, p. 137.
28) Geiger, R. : *Das Klima der bodennahen Luftschicht.* Vieweg, Brunswick 1927.
29) Geiger, R. : *Das Stationsnetz zur Untersuchung der bodennahen Luftschichten.* Deutsches meteorologisches Jahrbuch für Bayern 1923-1927. (1926 et 1927 en collaboration avec H. Amann).
30) Geiger, R. : *Gibt es eine Lufttemperatur der bodennahen Luftschicht?* Bioklimatische Beiblätter 1934, p. 115.
31) Geiger, R. : *Mikroklima und Pflanzenklima.* Handbuch der Klimatologie, Gebr. Bornträger, Berlin 1930.
32) Geiger, R. : *Ueber selbständige und unselbständige Mikroklimate.* Met. Ztschr. 1929, p. 539.
33) Geiger, R., et Amann, H. : *Forstmeteorologische Messungen in einem Eichenbestand.* Forstwissenschaftliches Zentralblatt 1931.
34) Geiger, R., Wœlfle, M., et Seip, L. Ph. : *Höhenlage und Spätfrostgefährdung.* Forstwissenschaftliches Zentralblatt 1933-1934.
35) Grad, Ch. : *La Météorologie forestière en Alsace-Lorraine.* Association française pour l'avancement des Sciences, Nancy 1886.
36) Haude, W. : *Temperatur und Austausch der bodennahen Luft über einer Wüste.* Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre XXI, p. 129.
37) Hornberger : *Studien über Luft- und Bodentemperaturen.* Forstwissenschaftliches Zentralblatt 1902, p. 479.
38) Hummel, K. : *Zum Mikroklima isolierter Standorte.* Deutsches meteorologisches Jahrbuch für Bayern 1929, B.
39) Innerebner, F. : *Ueber den Einfluss der Exposition auf die Temperaturverhältnisse im Gebirge.* Met. Ztschr. 1933, p. 337.
40) Juhlin, J. : *Sur la température nocturne de l'air à différentes hauteurs.* Comptes-rendus de la Société Royale des Sciences, Upsal 1890. Anal. dans Met. Ztschr. 1890, p. (73).
41) Kammermann, A. : *Die Vorausbestimmung des nächtlichen Temperatur-Minimums.* Met. Ztschr. 1886, p. 124.
42) Koch, G. H. : *Der Wald-Feldwind, eine mikroaerologische Studie.* Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre, XXII, Heft 2, p. 71.
43) Krügler, Fr. : *Ueber den Anteil des Massenaustausches am nächtlichen Wärmehaushalt der Erdoberfläche.* Met. Ztschr. 1932, p. 372.
44) Kühnert, W. : *Eine Beobachtung des Temperaturgradienten beim Auftreten von Strahlungsnebel ; die Entwicklung der Bodeninversion.* Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre XVIII, p. 219.
45) Maurer, H. : *Eigenartige Entstehung einer Sandhose.* Met. Ztschr. 1934, p. 275.
46) Mierdel, F. : *Ueber nächtliche Temperaturanstiege an der Möhne-Talsperre.* Met. Ztschr. 1923, p. 178.
47) Mörikofer, W. : *La température de l'air dans la couche d'un mètre d'épaisseur au-dessus du sol.* Comptes-rendus de la Société Suisse de Géophysique, Météorologie et Astronomie, 1921.
48) Müttrich, A. : *Ueber den Einfluss des Waldes auf die Lufttemperatur nach den in Eberswalde an verschieden aufgestellten Thermometern gemachten Beobachtungen.* Met. Ztschr. 1900, p. 356.
49) Nichols, E. S. : *Notes on damage to fruit by low temperatures ; predicting of minimum temperatures.* M. W. Rev. 1920, supplément N° 16, p. 37.
50) Nichols, E. S. : *Predicting minimum temperature, especially as a function of preceding temperature.* M. W. Rev. 1930, p. 179.
51) Nichols, E. S. : *Prediction minimum temperatures in Grand Valley, Colo.* M. W. Rev. 1918, p. 213.
52) Olivier, R. : *Moyens de protection des cultures contre la gelée.* La Mét. 1930, p. 138.
53) Ramdas et Atmanathan : *The vertical distribution of air temperature near the ground during night.* Gerlands Beiträge zur Geophysik, XXXVII, p. 116.
54) Robitzsch, M. : *Untersuchungen über kurzperiodische Schwankungen der Lufttemperatur.* Arbeiten des preussischen Observatoriums Lindenberg 1919, p. 95.
55) Schmidt, W. : *Der Massenaustausch in freier Luft, und verwandte Erscheinungen.* Probleme der kosmischen Physik VII. H. Grand, Hambourg 1925.
56) Schmidt, W. : *Einige Ergebnisse von Temperaturbeobachtungen an einem Hang.* Zeitschrift für angewandte Meteorologie 1930, p. 204.
57) Schmidt, W. : *Heizen und Räuchern als Schutz gegen Frost.* Met. Ztschr. 1924, p. 157.
58) Smith, J. W. : *Frost warnings and orchard heating in Ohio.* M. W. Rev. 1914, p. 573.
59) Smith, J. W. : *Predicting minimum temperatures.* M. W. Rev. 1917, p. 402.
60) Trabert, W. : *Die Bekämpfung der Frostgefahr.* Met. Ztschr. 1899, p. 529.
61) Vujević, P. : *Die Temperaturverhältnisse der untersten Luftschichten.* Sitzungsberichte der kais. Akademie der Wissenschaften, mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse, 1909, CXVIII, p. 971.
62) Woeikof, A. : *Temperatur der untersten Luftschicht.* Met. Ztschr. 1904, p. 49.
63) Woeikof, A. : *Probleme der Bodentemperatur. Typen ihrer vertikalen Verbreitung. Verhältnis zur Lufttemperatur.* Met. Ztschr. 1904, p. 51 et 399.
64) Young, F. D. : *Nocturnal temperature inversions in Oregon and California.* M. W. Rev. 1921, p. 138.
65) Young, F. D. : *Notes on the 1922 freeze in Southern California.* M. W. Rev. 1923, p. 581.

TABLE DES MATIÈRES.

Pages

Introduction 1

*I*re *Partie* : Étude de la répartition verticale de la température dans les premiers mètres au-dessus du sol.

1° Méthodes employées pour la mesure de la température de l'air au voisinage du sol . . 3
2° Description du matériel utilisé 5
3° Étude des résultats obtenus
I. Type diurne 10
II. Type nocturne 15
III. Transition d'un type à l'autre 19
Résumé 21

*II*e *Partie* : Étude de la répartition de la température de l'air en terrain accidenté.

1° Description des travaux effectués 22
2° Étude et interprétation des résultats obtenus 25
3° Influence du climat local sur les végétaux 32
4° Protection contre les gelées nocturnes 34
Résumé 39

*III*e *Partie* : Étude de la température de l'air en forêt.

1° Énumération des études antérieures 40
2° Description des travaux effectués 41
3° Étude des résultats obtenus 43
Résumé 49

*IV*e *Partie* : Notes sur la température des végétaux.

1° Exposé du mode opératoire 50
2° Description des résultats obtenus 50
3° Conclusions 54
Résumé 55

Index bibliographique 56

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

L'Ozone atmosphérique

Vu et approuvé :
Strasbourg, le 12 juillet 1935.
Le Doyen de la Faculté des Sciences,
E. ROTHÉ.

Vu et permis d'imprimer :
Strasbourg, le 17 juillet 1935.
Pour le Recteur de l'Académie :
Le Vice-Président du Conseil de l'Université,
E. LOBSTEIN.

IMP. ALSACIENNE ⊛ STRASBOURG